

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

Título: Análisis de la calidad del agua del embalse Hanabanilla según el comportamiento de los niveles de agua.

Autor: Elianis Valladares Hurtado

Tutor: Dr. Rodolfo Sánchez Morales

Santa Clara, Diciembre, 2019  
Copyright©UCLV

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Construcciones

Academic Department of Hydraulic Engineering

## **DIPLOMA THESIS**

Title: Analysis of the water quality on the Hanabanilla reservoir according to the behavior of water levels

Author: Elianis Valladares Hurtado

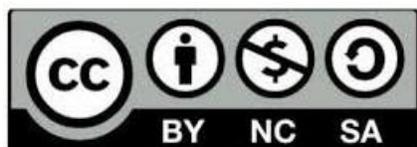
Thesis Director: Dr. Rodolfo Sánchez

Santa Clara , December, 2019  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

## **Pensamiento:**

Cuando la obra que forjamos lleva el amor y la entrega, entonces los resultados obtenidos son los complementos de un esfuerzo por construir el futuro y el bienestar de los hombres de buena voluntad.

Che

## **Agradecimientos:**

A todos los que hicieron posible este trabajo, fruto de mucho estudio y dedicación, en especial:

A mi tutor **Rodolfo Sánchez Morales** quien compartió su escaso tiempo para facilitarme la realización de esta investigación.

A mi profesora de Calidad de agua **Maritza Moreno** quien me ofreció su ayuda incondicional.

A mi amiga **Elianni Ruiz de la Cruz** por su tiempo y su apoyo incondicional.

A los profesores del **Departamento de Ingeniería Hidráulica** quienes me formaron como la profesional que soy hoy.

A toda **mi familia** en especial a mis padres por hacerme realidad este sueño.

A todos, muchas gracias.

## **Resumen**

En el presente trabajo se realiza un estudio de la calidad de agua de embalse Hanabanilla, perteneciente al municipio de Manicaragua, para evaluar cómo influye la variación de los niveles de agua y el comportamiento de su calidad. Se determinaron los valores del Índice de Calidad de Aguas (ICA) y se estudiaron los niveles el embalse según los balances hídricos. A partir de los valores de los parámetros de la estadística descriptiva y su correlación de las variables consideradas se demostró que no existe una relación significativa entre los niveles y la calidad del agua.

## **Abstract**

In the present work, a study of the quality of Hanabanilla reservoir water, belonging to the municipality of Manicaragua, is carried out to evaluate how the variation of water levels influences and the behavior of its quality. Water Quality Index (ICA) values were determined and reservoir levels were studied according to water balances. From the values of the parameters of the descriptive statistics and their correlation of the variables considered, it was demonstrated that there is no significant relationship between the levels and the quality of the water.

## Índice

Pensamiento: .....	VII
Agradecimientos: .....	VIII
Resumen .....	IX
Introducción .....	13
Capítulo 1. Revisión bibliográfica .....	17
1.1 Caracterización y uso de los embalses .....	17
1.1.1 Parámetros morfométricos de los embalses .....	20
1.2 Balance hídrico .....	22
1.3 Calidad de agua .....	23
1.3.1 Índices de calidad de agua (ICA).....	24
1.3.2 Principales parámetros de calidad de agua que influyen en el ICA .....	25
1.4 Factores que influyen sobre la calidad del agua. ....	28
1.5 Influencia de los cambios de nivel del embalse sobre la calidad del agua.....	30
1.6 Aspectos fundamentales del embalse Hanabanilla .....	30
Capítulo 2: Materiales y Métodos .....	35
2.1 Análisis de los parámetros morfométricos de los embalses .....	35
2.2 Análisis del Balance Hídrico .....	36
2.2.1 Determinación de niveles de agua del embalse Hanabanilla. ....	42
2.3 Análisis de la calidad del agua del embalse Hanabanilla .....	43
2.3.1 Algoritmo propuesto para el cálculo del ICA. ....	43
2.3.2 Análisis de los parámetros que influyen en el ICA.....	46
2.4 Análisis de los niveles del embalse con el ICA .....	47
Capítulo 3 Resultados y sus análisis. ....	48

3.1 Cálculo de los parámetros morfométricos del embalse Hanabanilla .....	48
3.2 Comportamiento de niveles de agua del embalse Hanabanilla .....	48
3.2.1 Determinación de los parámetros que influyen en los cambios de niveles del embalse Hanabanilla. ....	51
3.3 Calidad del agua del embalse Hanabanilla .....	53
3.3.1 Cálculo del ICA .....	54
3.3.2 Parámetros que influyen en los cambios del ICA .....	55
3.4 Relación de los niveles del embalse con el ICA .....	61
Conclusiones y Recomendaciones .....	64
Conclusiones .....	64
Recomendaciones .....	64
Referencias Bibliográficas .....	65
Bibliografía: .....	67
ANEXOS.....	70

## **Introducción**

En la naturaleza el agua y los seres vivos son dos componentes inseparables; los seres humanos necesitamos este recurso natural y queremos que siempre esté disponible y a la mano. Para cumplir este propósito de vital importancia, desde los albores de la civilización hemos querido manejar el agua de los cauces, ríos y lagos, mediante la construcción de canales, presas, embalses y otras obras a las que se las denomina hidrotécnicas (Sandoval, 2018).

El embalse es la acumulación de agua producida por una construcción en el lecho de un río o arroyo que cierra parcial o totalmente su cauce. En sus inicios, la humanidad manejó volúmenes pequeños de agua, pero poco a poco fue incrementando su capacidad de almacenar y conducir mayores volúmenes, lo que provocó el desarrollo y afianzamiento de toda una ciencia alrededor del aprovechamiento hídrico (Betancourt, 2012).

Este desarrollo hídrico viene enlazado con la calidad del agua ya que el agua tiene un doble valor, es un elemento del ecosistema y es consecuentemente un activo social. Su calidad y escasez es una problemática que afecta la producción de alimentos, la salud, la estabilidad política y social. La calidad del agua se ve afectada por una variedad de factores, tanto naturales como relacionados con las actividades del hombre, debido a que a mayores volúmenes embalsados la calidad del agua variará considerablemente a partir de factores como el potencial hidrogeniónico(pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), temperatura(T), demanda química de oxígeno (DQO), los coliformes termotolerantes o fecales (CF), entre otros.(Moacyr, 2012).

Los embalses se destacan por tener oscilaciones en la calidad del agua debido a factores que influyen en su variación, y las variaciones de los niveles del agua es un factor importante sobre el cual el régimen de explotación influye por ello que se hace necesario la implementación de programas de vigilancia para garantizar la seguridad del agua de consumo. Estos programas deben comprender estudios sistemáticos de las cuencas de captación y de las fuentes o embalses de almacenamiento en función de identificar problemas ambientales.

El uso de Índices de Calidad del Agua (ICA) puede resultar muy beneficioso para el análisis e interpretación de los datos generados en los programas de monitoreo de los cuerpos acuáticos, así como para la gestión ambiental de los mismos. Estos índices son herramientas ideales para brindar un diagnóstico general sobre el estado de un cuerpo de agua y facilitar la toma de decisiones para actuar preventiva o correctivamente sobre el mismo. Se formulan a través de la medición de determinados parámetros en la situación operacional, referenciados con los de otra situación que se considera admisible o deseable, y que viene definida por ciertos criterios (Mabel Seisdedo, 2014-2015).

En el embalse Hanabanilla, ubicado en el municipio villaclareño de Manicaragua, en el centro de la isla de Cuba, está caracterizado por tener excelente calidad de agua aunque en ocasiones esta calidad varía.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación tiene como **Campo de acción** el análisis de la calidad de agua del embalse Hanabanilla tomando como **Objeto de estudio** la influencia de las variaciones de niveles sobre calidad de agua.

#### **Problema de investigación:**

El agua del embalse Hanabanilla, empleada como fuente de abasto a la población, tiene variaciones en su calidad que afectan su uso. Por esta razón, se hace necesario determinar las fluctuaciones de los indicadores de calidad del agua y su relación con otros factores, principalmente con los cambios de niveles de agua en el embalse.

#### **Hipótesis:**

Si se establece una relación entre la calidad y los niveles del agua en el embalse Hanabanilla, es posible conocer cómo debe operarse el embalse bajo diferentes escenarios, permitiendo también proponer procesos de tratamientos más adecuados, que implican ahorros económicos.

#### **Objetivo General:**

Evaluar cómo influye la variación de los niveles de agua del embalse Hanabanilla en el comportamiento de la calidad del agua.

### **Objetivos específicos:**

- Elaborar el marco teórico que sirva de soporte a la presente investigación, a partir del análisis de fuentes de información tanto clásicas como recientes, nacionales e internacionales, que traten los elementos relacionados con el tema objeto de estudio.
- Determinar el comportamiento de la calidad del agua y de los niveles del agua en el embalse Hanabanilla durante el período de tiempo definido.
- Establecer la posible influencia de las variaciones de los niveles del embalse sobre la calidad de agua en el embalse.

### **Tareas investigativas:**

- Recopilación de la bibliografía general y datos históricos del balance hídrico y calidad del agua del embalse Hanabanilla.
- Estudio de los fundamentos teóricos de la calidad de agua del embalse Hanabanilla.
- Redacción del capítulo 1: Revisión bibliográfica.
- Estudio y selección de los valores de niveles de agua según los balances hídricos.
- Estudio y selección de los indicadores de calidad según los muestreos de la calidad del agua.
- Establecer y explicar los métodos que se utilizarán para la obtención de los datos requeridos en la investigación.
- Ejecución del capítulo 2: Materiales y Métodos.
- Cálculo del ICA
- Conformación de la base de datos con las variables de estudio.
- Aplicación de las técnicas estadísticas y de correlación.
- Elaboración del capítulo 3: Resultados y sus Análisis.
- Redacción de las conclusiones y recomendaciones.

### **Límite de la investigación**

Desde el punto de vista geográfico la investigación tiene su límite en embalse Hanabanilla, ubicado en el municipio villaclareño de Manicaragua, construido al noroeste del Macizo de Guamuhaya, en el centro de la isla de Cuba.

Respecto al límite del estudio, se analiza el comportamiento de las variaciones de nivel del agua, de la calidad del agua y las posibles relaciones entre estas variables.

## **Capítulo 1. Revisión bibliográfica**

En este capítulo se exponen las bases teóricas que sirven de sustento a la presente investigación, destacando un grupo de aspectos que facilitan la comprensión de términos y definiciones que son objeto de análisis en el desarrollo del trabajo. Para ello, fue consultada bibliografía tanto clásica como actual, nacional e internacional.

### **1.1 Caracterización y uso de los embalses**

Los embalses son estructuras de construcción de mucha utilidad, ya que son usados en campos como el riego, el aprovechamiento y generación de energía, el control de inundaciones, la navegación, la pesca, control de sedimentos, y la recreación.

Dependiendo de las características del valle, si este es amplio y abierto, las áreas inundables pueden ocupar zonas densamente pobladas, o áreas fértiles para la agricultura. En estos casos, antes de construir la presa debe evaluarse muy objetivamente las ventajas e inconvenientes, mediante un estudio de impacto ambiental, cosa que no siempre se ha hecho en el pasado (Moacyr, 2012).

### **Caracterización y uso de los embalses en Cuba**

El potencial hídrico de Cuba asciende a  $38,1 \text{ km}^3$ , de los cuales  $31,6 \text{ km}^3$  (83 %) corresponden a las aguas superficiales y  $6,5 \text{ km}^3$  (17 %) a las aguas subterráneas. De este potencial solo son aprovechables  $24 \text{ km}^3$  y de ellos están disponibles  $13,6 \text{ km}^3$ , con una mayor incidencia en las aguas superficiales (67 %) (M, 2007). El desarrollo hidráulico cubano ha posibilitado utilizar el 57 % de los recursos hídricos aprovechables, mediante la creación de la infraestructura técnica pertinente para incrementar en 200 veces la capacidad de embalse del país y lograr que el 92,4 % de toda la población tuviese acceso al agua potable y el 95,8 % al saneamiento.

La Estrategia Ambiental Nacional 2007-2010 (EAN) identificó por vez primera a la carencia de agua como uno de los principales problemas ambientales de Cuba, aun cuando el desarrollo hidráulico cubano había elevado las capacidades de embalse a más de 9 600 millones de metros cúbicos desde 1959 (CITMA, 2007).

Los eventos hidrometeorológicos extremos más importantes en Cuba lo constituyen los ciclones tropicales y las sequías, los que provocan grandes pérdidas materiales y

económicas. Los mayores volúmenes de lluvia están asociados con algunos de los fenómenos meteorológicos más significativos (ciclones tropicales, frentes fríos, ondas tropicales) o tienen su origen en el calentamiento diurno, ocurriendo casi siempre en horas de la tarde en forma de episodios de corta duración. En presencia de sistemas meteorológicos de gran escala pueden producirse períodos de grandes lluvias, sobre todo en los meses de mayo - junio y septiembre - octubre. (Duque, 2018)

En correspondencia con los niveles de precipitación y evaporación anual, el país logra acumular, en un período normal, alrededor de 30 km<sup>3</sup> de agua, de los cuales se extraen unos 7 km<sup>3</sup> cada año, lo que significa el 23 %, casi una cuarta parte del acumulado, reflejando una gestión insostenible del recurso.(M, 2006)

La gravedad de los más recientes procesos de sequía en Cuba radica en que los déficits en los acumulados anuales de las lluvias, clasificados como moderados y severos, se duplicaron en el período normal 1961-1990 con respecto al período anterior 1931-1960. A ello se le suma la tendencia decreciente de la media histórica nacional de las precipitaciones, al disminuir 133 mm en el período 1961-2000 con respecto al período 1931-1960, siendo la nueva media de referencia de 1 335 mm, con decrecimiento en las tres regiones del país, particularmente en la región oriental con 260 mm menos, con singular impacto negativo en la cuenca del río Cauto con 367 mm menos y en la cuenca Guantánamo-Guaso con 154 mm menos(Rodríguez, 2006).

La acción humana sobre los recursos hídricos del país tiene una enorme incidencia sobre su vulnerabilidad actual y futura, así como introduce determinada incertidumbre acerca de la calidad y disponibilidad del agua tanto en el presente como para los años venideros. Varias son las manifestaciones de esta acción de origen antrópico, esencialmente la contaminación, el despilfarro, el incremento de la demanda para todos los usos, principalmente el agropecuario y el uso irracional.(Betancourt, 2012)

Los principales usos de los embalses en Cuba son para el abastecimiento de agua a las poblaciones y el riego a los cultivos en el caso específico de la región central del país, en la provincia de Villa Clara, los usos principales de los embalses se muestran a continuación en la tabla1.1.

**Tabla 1.1 Embalses y sus usos**

<b>Villa Clara</b>	<b>Capacidad (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Usos</b>
Palma Sola	76	Riego
La Quinta	30	Riego
Santa Clara	36	Riego y Abasto
Palmarito	55	Riego y Abasto
Arroyo Grande II	20	Riego
Manicaragua	4.4	Hidroenergía, Riego y Abasto
Gramal	2	Abasto
Hanabanilla-Jibacoa	278	Hidroenergía y Abasto.
Las Mercedes	3.6	Riego
Agabama	4	Abasto
Minerva	118	Riego y Abasto
Alacranes	352	Riego y Abasto

El embalse Hanabanilla (ver figura 1.1) ubicado en la región central del país, se extiende desde el extremo sureste de Villa Clara, hasta el nordeste de la provincia de Cienfuegos. Su principal uso es la producción de energía eléctrica y abasto a la población, su cuenca es considerada como una cuenca hidrográfica de interés nacional, su gran atractivo paisajístico y turístico, su potencial, presente y futuro, para el desarrollo de la pesca deportiva de la lobina negra (micropterossalmoides), su valor como vía de transporte para los pobladores asentados en su cuenca, etc, son elementos por los que es necesario el cuidado y uso racional de sus aguas.(Molina and Sanchez, 1993)



**Figura 1.1 Embalse Hanabanilla**

La calidad de agua del embalse Hanabanilla puede variar y depende entre otras cosas del lugar de toma del agua, por ejemplo, las tomas de fondo como su nombre lo indica toman el agua desde el fondo del embalse, dicha agua tiene problema con su calidad debido puede aumentar la deposición de los sólidos, la reducción de la turbidez de los sólidos en suspensión y a la retención de especies disueltas. Si el tiempo de retención de las aguas embalsadas es lo suficientemente largo, estas pueden estratificarse térmicamente y ocurrir afloraciones de algas y producirse condiciones anaeróbicas, deteriorándose la calidad del agua apareciendo malos olores y sabores, incrementándose la concentración de especies indeseables como: Hierro, manganeso, amoníaco y sulfhídrico afectando la calidad del agua de entrega.(Molina and Sanchez, 1993)

Es por ello que se requiere de un tratamiento extensivo pero a la vez convencional para que el agua se pueda calificar como agua potable de acuerdo a los parámetros que rige la Norma Cubana 827-2012 Agua Potable - Requisitos Sanitarios.(827:, 2012)

### **1.1.1 Parámetros morfométricos de los embalses**

La morfometría es el conjunto de métodos para medir las dimensiones físicas de un individuo o sistema. Las evaluaciones morfométricas en embalses constituyen una

herramienta importante para la comprensión de los eventos físico-químicos y biológicos que ocurren en estos ambientes.(WIKIPEDIA)

Los parámetros morfométricos de un embalse son de simple obtención y pueden suministrar algunas informaciones sobre el comportamiento del ecosistema del ambiente acuático. Estos parámetros son divididos en primarios, obtenidos directamente, y secundarios, obtenidos por medio de relaciones entre los parámetros primarios(Wetzel, 1981).

Los principales parámetros morfométricos que influyen en el ambiente acuático son: área (A), volumen (V), profundidad máxima ( $Z_{m\acute{a}x}$ ), perímetro (P), largo máximo( $C_{m\acute{a}x}$ ), ancho máximo ( $L_{m\acute{a}x}$ ), área de la cuenca de drenaje (Acuenca), altitud, profundidad media ( $Z_{med}$ ), ancho medio ( $L_{med}$ ), profundidad relativa ( $Z_r$ ), desarrollo del perímetro ( $D_p$ ), desarrollo del volumen declive de los márgenes ( $D_v$ ), factor de envolvimiento (F) (Moacyr, 2012).

El conocimiento de la forma de un lago o embalse es fundamental, dado que existe una relación de la forma con la circulación de agua y con los mecanismos limnológicos de funcionamiento de estos ecosistemas. La morfometría de los embalses influye considerablemente en la dinámica de los procesos en el agua y en el sedimento, teniendo en cuenta la acción de los vientos y los mecanismos de circulación inducida por el viento y por el enfriamiento y calentamiento térmico. La radiación solar, formación de corrientes horizontales y verticales, actuación del viento, existencia de bahías y reentradas y aportes de la cuenca de drenaje son ejemplos de condicionantes morfométricos que afectan tanto la localización de macro y microorganismos en cuanto a la distribución de compuestos químicos disueltos y particulados en el ecosistema acuático.(Duque, 2018)

Por tanto, podemos observar que la morfometría también influye sobre el metabolismo de los cuerpos de agua del embalse. El Índice Morfoedáfico (IME), razón entre la concentración de sólidos totales disueltos (mg/L) y la profundidad media (metros), puede ser indicativa de la biomasa potencial de peces en lagos y embalses.(Sánchez et al., 2002)

## 1.2 Balance hídrico

El estado inicial (en el instante  $t$ ) de la cuenca o parte de esta, para efecto del balance hídrico, pueden definirse como, la disponibilidad actual de agua en las varias posiciones que esta puede asumir, como por ejemplo: volumen de agua circulando en los ríos, arroyos y canales; volumen de agua almacenado en lagos, naturales y artificiales; en pantanos; humedad del suelo; agua contenida en los tejidos de los seres vivos; todo lo cual puede definirse también como la disponibilidad hídrica de la cuenca.(ALEXANDRA MOREIRA LÓPEZ, 2016).

Las **entradas de agua** en la cuenca hidrográfica pueden darse de las siguientes formas((INRH), 1991):

- Precipitaciones: lluvia; nieve; granizo; condensaciones;
- Aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas colindantes, en efecto, los límites de los acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de los partidores de aguas que separan las cuencas hidrográficas;
- Transvase de agua desde otras cuencas, estas pueden estar asociadas a:
  - Descargas de centrales hidroeléctricas cuya captación se sitúa en otra cuenca, esta situación es frecuente en zonas con varios valles paralelos, donde se construyen presas en varios de ellos, y se interconectan por medio de canales o túneles, para utilizar el agua en una única central hidroeléctrica.
  - Descarga de aguas servidas de ciudades situadas en la cuenca y cuya captación de agua para uso humano e industrial se encuentra fuera de la cuenca, esta situación es cada vez más frecuente, al crecer las ciudades, el agua limpia debe irse a buscar cada vez más lejos, con mucha frecuencia en otras cuencas. Un ejemplo muy significativo de esta situación es la conurbación de San Pablo, en el Brasil.

Las **salidas de agua** pueden darse de las siguientes formas:

- Evapotranspiración: de bosques y áreas cultivadas con o sin riego.
- Evaporación desde superficies líquidas, como lagos, estanques, pantanos, etc.

- Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos.
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas.
- Derivaciones para consumo humano y en la industria.
- Salida de la cuenca, hacia un receptor o hacia el mar.

El establecimiento del balance hídrico completo de una cuenca hidrográfica es un problema muy complejo, que involucra muchas mediciones de campo. Con frecuencia, para fines prácticos, se suelen separar el balance de las aguas superficiales y el de las aguas subterráneas(ALEXANDRA MOREIRA LÓPEZ, 2016).

### **1.3 Calidad de agua**

En la literatura, se encuentran varias definiciones de “Calidad del agua”, y en todas se observan criterios abióticos (físico-químicos) y bióticos (biológicos) en relación a su utilización. Estos criterios de calidad del agua especifican concentraciones y/o límites de algunos parámetros que interfieren en la conservación del ecosistema acuático y protección de la salud humana (Betancourt, 2012).

Siendo así, se puede definir calidad del agua como un conjunto de características de naturaleza física, química y biológica que asegura determinado uso o conjunto de usos, debiendo estar dentro de ciertos límites o estándares previstos en la legislación vigente para que estos puedan ser viabilizados(Moreno, 2009).

Algunos parámetros pueden presentar más de un criterio de control, dependiendo del uso y de las condiciones naturales del agua. Por ejemplo, el potencial hidrogeniónico(pH), la conductividad eléctrica, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Oxígeno disuelto, la temperatura y el número más probable de coliformes en el agua serán distintos dependiendo del uso: para consumo humano, los valores deberán respetar la norma cubana NC: 827- 2012 Agua Potable(827:, 2012).

En el ámbito de las cuencas hidrográficas de un estado o país, cuando se desea tener una visión de conjunto de la calidad de las aguas, se adopta un esquema de muestreo en varios puntos, formando una red de puntos de muestreo. Las actividades de monitoreo se dividen en dos grandes grupos: el de adquisición de datos, que abarca las

actividades operacionales de la red de monitoreo y; el de la utilización de los datos, que engloba aspectos principalmente de información(Sandoval, 2018).

El monitoreo y la evaluación de la calidad de las aguas superficiales son factores primordiales para la adecuada gestión de los recursos hídricos, permitiendo la caracterización y el análisis de tendencias y prospecciones de escenarios en cuencas hidrográficas, siendo esenciales para garantizar la implementación de los diferentes instrumentos de gestión presentados en la ley, tales como: plan de cuenca, concesión, cobranza y encuadre de los cursos de agua (Duque, 2018).

El uso de Índices de Calidad del Agua (ICA) surge de la necesidad de sintetizar la información sobre varios parámetros físico-químicos y biológicos, con miras a informar a la población y orientar las acciones de planeamiento y gestión de la calidad del agua. Estos índices facilitan la comunicación con el público lego, ya que permiten sintetizar varias informaciones en un número único. Por otro lado, en este proceso de síntesis se produce la pérdida de información sobre el comportamiento de los parámetros analizados. Por tanto, cualquier análisis más detallado debe considerar los parámetros individuales que determinan la calidad de las aguas (Moacyr, 2012).

### **1.3.1 Índices de calidad de agua (ICA)**

Un ICA es un algoritmo que expresa, una medida de la evaluación del estado cualitativo de la calidad del agua. Es una expresión simplificada de una compleja combinación de factores diferentes, cuyo éxito en su aplicación depende de su confiabilidad y de la cantidad de información, realmente resumida y utilizable, que ofrezca. Su resultado final, puede ser un número, un símbolo único o una combinación simple de variables numéricas o alfa-numéricas mide en términos de calidad lo que diseñaron sus autores conceptualmente(Moreno, 2009).

El ICA tiene, entre otras, las ventajas siguientes(Díaz, 2014):

- Permite mostrar la variación espacial y temporal de la calidad de las aguas, evidenciando la tendencia a mejoras o empeoramiento de dicha calidad.
- Es un procedimiento relativamente sencillo que expresa de forma resumida la calidad de las aguas.
- Relaciona, de acuerdo a su estructura, su valor con determinados usos del agua.

- Permite a los usuarios, público en general y tomadores de decisiones una fácil interpretación de los datos de calidad.
- Clasifica y ordena la calidad de las aguas en las cuencas hidrográficas (superficiales y subterráneas), evaluando las tendencias de la calidad del agua y su relación con las normativa vigentes.
- Elabora tablas y mapas temáticos sobre los parámetros seleccionados, en cuencas, sub-cuencas y tramos de cuerpos de agua, donde se muestra la tendencia de los indicadores y su mutua interrelación.
- Controla operativamente en tiempo real el estado de la calidad del agua en los puntos de control (estaciones de monitoreo).
- Evalúa de manera sistemática los programas de monitoreo, así como el estado técnico de los laboratorios asociados al monitoreo, teniendo en cuenta los ejercicios de intercalibración de la calidad de los datos suministrados, si esta tarea se incluye en el diseño.

### **1.3.2 Principales parámetros de calidad de agua que influyen en el ICA**

Los principales parámetros de calidad de agua que influyen en el ICA son el pH, la Conductividad Eléctrica, el oxígeno disuelto, la DQO y los coliformes fecales.

#### **El pH**

El pH (potencial hidrogeniónico) representa la concentración de iones de hidrógeno  $H^+$  (en escala anti-logarítmica) en el agua y representa la intensidad de las condiciones ácidas o alcalinas del ambiente acuático. Este parámetro probablemente es uno de los más utilizados en la rutina de monitoreo de la calidad del agua (Moacyr, 2012).

Es un parámetro básico de calidad del agua que indica el grado de acidez o basicidad del agua. Este parámetro tiene mucha influencia en una serie de reacciones que ocurren en el agua. Por lo general, un agua con pH menor de 6.0 es considerada agresiva y corrosiva para los metales. Aguas con pH menor de 6.00 se considera acida, con valores cercanos a 7.00 neutra y alcalina al aumentar su pH (Díaz, 2014).

#### **Conductividad eléctrica**

La llamada conductividad eléctrica, o conductancia eléctrica específica (CE), es uno de los parámetros físicos de mayor importancia en la química de las aguas naturales, es posiblemente el parámetro individual que mayor información nos aporte. Su medición es sencilla, rápida y exacta. Hoy en día en el mercado internacional, a costos asequibles, se pueden encontrar equipos medidores de la conductividad de muy alta resolución que incorporan la corrección de temperatura, miden la salinidad y en algunos casos son capaces de hacer mediciones continuas. La conductividad eléctrica se expresa según nomenclatura del SI de unidades en micro Siemens por cm ( $\mu\text{S/cm}$ )(Díaz, 2014).

Los iones, tanto cationes como aniones, son partículas cargadas eléctricamente y son responsables de la conducción de una determinada corriente a través de una solución. Es evidente, que a una mayor presencia de estos iones, una mayor concentración, la corriente a través de la solución será mayor, y por ende mayor será la denominada conductividad. Por lo tanto, la conductividad nos da una medida indirecta del contenido iónico de la solución, en este caso del agua natural, sabemos que este contenido iónico se puede interpretar como la salinidad del agua en cuestión, o como se le llama los sólidos disueltos totales (SDT). Para el caso del ICAS la CE como parámetro de calidad expresa la salinidad del agua en cuestión(Díaz, 2014).

### **Oxígeno disuelto**

Entre los gases disueltos, el oxígeno ( $\text{O}_2$ ), es un gas de gran importancia biológica y en el agua participa de un sinnúmero de reacciones químicas en los ecosistemas acuáticos. Todos los organismos heterotróficos dependen de una forma u otra del oxígeno para mantener los procesos metabólicos de producción de energía y de reproducción. Las principales fuentes de oxígeno para el agua son la atmósfera y la fotosíntesis. Por otro lado, las pérdidas ocurren por el consumo y la descomposición de materia orgánica (oxidación), hacia la atmósfera, por la respiración de organismos acuáticos y por la oxidación de iones metálicos como, por ejemplo, el hierro y manganeso. Su disolución en la interfaz aire-agua generalmente ocurre en condiciones de intensa circulación vertical o en un proceso lento de difusión y transporte por convección. La concentración de oxígeno disuelto en el agua depende de los

coeficientes de cambio del oxígeno entre la atmósfera y la superficie del agua (Moacyr, 2012).

El valor del oxígeno disuelto a saturación (100%) en una masa de agua depende de la temperatura, presión y salinidad. Existen múltiples tablas en la literatura, lo usual es emplear la tabla o el método de cálculo empleado en “Standard Method for Examination of Water and Waste Water” (SMWW), ver tabla a continuación para 760 mm de Hg (altura correspondiente a cero metros sobre el nivel del mar (Díaz, 2014).

### **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de materia orgánica e inorgánica, en especial compuestos reductores, en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte (Díaz, 2014).

La DQO permite hacer estimaciones de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), que a su vez es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en el proceso biológico de degradación de la materia orgánica en el agua; El término degradable puede interpretarse como expresión de la materia orgánica que puede servir de alimento a las bacterias; a mayor DBO, mayor grado de contaminación. Los residuales domésticos poseen un  $DBO_5$  entre 150 – 300 mg/l. Por tanto, la DQO se relaciona de manera directa con la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), asociado a las descargas de materia orgánica y otras (Moacyr, 2012).

La DQO se presenta en los cuerpos de agua y en los efluentes de aguas domésticas y plantas industriales, pero no es un indicador del carbono orgánico total presente en el cuerpo de agua, puesto que algunos compuestos orgánicos no son oxidados por el dicromato de potasio, mientras que algunos compuestos inorgánicos sí lo son. Sin embargo, para descargas de aguas residuales domésticas se considera como un buen indicador (Sandoval, 2018).

### **Coliformes Termotolerantes o Coliformes Fecales**

La calidad microbiológica de los cuerpos receptores superficiales en el ICAS se define a través de la densidad de bacterias, expresadas como Coliformes Termotolerantes o Fecales, ya sean determinadas por el método de tubos múltiples o conteo en

placa(Moacyr, 2012).

Las bacterias del grupo Coliformes presentes en la heces de animales de sangre caliente generalmente incluyen organismos capaces de fermentar la lactosa, produciendo gas a una temperatura cercana a los 44.5 grados Celsius, este es el criterio utilizado para definir el componente fecal en una muestra de agua. Lo usual, en el caso de aguas naturales con posibles impactos de aguas residuales domésticas, es llevar a cabo la determinación del NMP/100ml a partir de la filtración de la muestra y seleccionar la alternativa de 5 tubos con diluciones múltiples, empleando el método de tubos múltiples, también se puede utilizar el método de filtración por membrana(Moacyr, 2012).

El rango de Coliformes fecales en el ICA es amplio, pues se puede estar en presencia de aguas muy limpias en las cabeceras de los ríos sin influencia de contaminación, o en tramos afectados por descargas de residuales domésticos (Díaz, 2014).

#### **1.4 Factores que influyen sobre la calidad del agua.**

Las aguas naturales adquieren su composición química mediante un complejo proceso de interacciones físico – químicas en el que intervienen además factores de tipo geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, climáticos, microbiológicos y ambientales. En Cuba los principales factores que intervienen en la calidad del agua son de tipo geológicos, geográficos y socioeconómicos (Moreno, 2009).

Geológicos: Alrededor del 67 % de la superficie del territorio cubano (106 728 km<sup>2</sup>) corresponden a complejos de rocas carbonatadas, en gran medida carsificadas y con un alto grado de acuosidad de 10 – 300 L/s. El subsuelo y lechos fluviales del país, constituidos en su gran mayoría a partir de rocas calizas y las dolomitas o calizas dolomitas, aportan sales de calcio que son capaces de disolverse en el agua con la que entra en contacto, alterando su contenido salino.

Geográficos: Un factor de suma importancia es la insularidad, que determina una interacción permanente con las aguas marinas o costeras, equilibrio que puede afectarse por causas antropogénicas, aumentando el contenido de sodio y cloruro en las aguas superficiales y subterráneas.

Socio-económicos: Como consecuencia del desarrollo económico y social del país, el agua está sometida a impactos negativos en cuanto a su calidad, como resultado de no disponer de adecuado tratamiento, por el reuso de aguas residuales, la deforestación y el empleo de químicos en la agricultura, acompañado ello, con el mal uso de los suelos.

La contaminación del agua, puede ser considerada como las modificaciones de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, restringiendo su uso en varias aplicaciones donde habitualmente son utilizadas (Fired, 1986).

El agua contaminada a aquella que ha sido afectada por la acción del hombre, en magnitud por encima de sus variaciones naturales, que hacen que sobrepasen los valores permisibles máximos de las concentraciones establecidas por los estándares para el agua potable, de uso industrial o de uso agrícola (Mattes, 1984).

La disponibilidad de agua dulce constituye uno de los problemas más críticos de los recursos naturales que enfrenta la humanidad. Al iniciarse el tercer milenio la población mundial se está expandiendo rápidamente, pero la cantidad de agua sigue siendo la misma que dos mil años atrás cuando estaba habitada por menos del 3 % de la población actual. Los ecosistemas acuáticos son los más amenazados por el cambio climático y el crecimiento poblacional, según las consideraciones realizadas en la Evaluación de los Ecosistemas del Planeta (MEA) y en el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC).

El cambio climático puede traer afectaciones sobre los recursos hidráulicos cubanos. (CITMA, 2011) Entre estas afectaciones se pueden destacar:

- Cambios en los patrones de comportamiento de las precipitaciones, principal fuente renovable anual del recurso agua, los cuales producen modificaciones en el tiempo de residencia del agua embalsada.
- Nuevos déficits en el suministro de aguas subterráneas, fundamentalmente para abastecimiento de la población y uso agrícola, lo cual provoca un mayor consumo de las aguas embalsadas.
- Cambios en la aparición de ciclos de sequías, tanto meteorológica, como hidrológica, hidráulica y socio-económica, con afectaciones al medio ambiente, la

economía y la sociedad, lo cual ocasiona variaciones en el tiempo de residencia del agua en los embalses.

- Cambios en la dinámica de las relaciones de los componentes ambientales (agua-suelo- bosques-aguas costeras).
- Incremento del tiempo de residencia del agua en los embalses por el aumento de los periodos de sequía.
- Aparición paulatina de zonas con carencias relativas de agua, quedando sin satisfacer las necesidades del recurso para la economía, la sociedad y la protección del medio ambiente.
- Conflictos en el uso de las aguas embalsadas, principalmente entre su uso agrícola y acuícola, al competir ambos por disponibilidades menores que las actuales.

## **1.5 Influencia de los cambios de nivel del embalse sobre la calidad del agua**

Según(Wetzel, 1981),sobre la calidad del agua en un embalse influyen los siguientes parámetros:

1. Relación área de la cuenca contra área del embalse
2. Uso del suelo de la cuenca.
3. Topografía o relieve de la cuenca.
4. Morfología del embalse. Parámetros morfométricos volumen del hipolimnion y otros.
5. El estado trófico del embalse, principalmente los contenidos de nitrógeno y fósforo.
6. Régimen de explotación del embalse, mediante su influencia en varios de los parámetros antes mencionados.

## **1.6 Aspectos fundamentales del embalse Hanabanilla**

### **Situación geográfica**

La cuenca del embalse, con altura media de 635 msnm y un área de 191,6 km<sup>2</sup>, está ubicada en el macizo montañoso Escambray, extendiéndose desde el extremo sureste de Villa Clara, hasta el nordeste de la provincia de Cienfuegos. Sus límites geográficos están entre los 80°00' y los 80°11' de longitud oeste y entre los 20°05'48'' y 21°56'24'' de latitud norte, en toda la vertiente sur de la isla. El lago se formó al ser represados los ríos Hanabanilla y Jibacoa, afluentes de los ríos Arimao y Agabama, respectivamente. Finalmente se unieron ambos cierras mediante un canal artificial a través de las divisorias de estas cuencas. El eje principal del embalse está orientado en la dirección noroeste-suroeste, a lo largo de los ríos Hanabanilla y Negro, extendiéndose el embalse hacia los brazos interiores de los ríos Hanabanilla, Negro y Guanayara (Molina and Sanchez, 1993).

## **Historia**

Embalse conocido por el nombre de Hanabanilla, que en lengua aborigen quería decir “pequeña cesta de oro”. Y aunque en la zona nunca se ha descubierto un yacimiento del preciado mineral, lo cual no quiere decir que no lo hubiera en vida de los nativos, bien pudiera haber merecido tal nombre debido a los incomparables valores naturales que guarda. Eso sí, el más preciado valor de aquel lugar, y que también pudiera haber dado su nombre a la zona, era la joven princesa india Hanabanilla, hija del cacique Arimao, uno de los más respetados de la isla. El lago Hanabanilla único con características intramontañas del país, sitio ideal para los amantes de la naturaleza, está ubicado en el municipio de Manicaragua, provincia de Villa Clara. El Hanabanilla cuenta con un espejo de agua de 14,9 kilómetros cuadrados, y entre 30 y 40 metros de profundidad como promedio, con una altitud sobre el nivel del mar de 364 metros y un potencial de almacenamiento en torno a los 300 millones de metros cúbicos. Ocupa el lugar otrora conocido como Valle de la Siguatepeuma, donde se establecieron siglos emigrantes gallegos dedicados en lo fundamental al cultivo del café. Cultura e historia se dan la mano además con tradiciones heredadas de la época de la colonia, unido a sitios de características únicas para actividades náuticas, programas de senderismo y opciones dedicadas al turismo ecológico (EcuRed, 2018).

## **Clima**

Los factores naturales pueden afectar el grado de eutrofización de los embalses y se relacionan principalmente con la cuenca de drenaje y entre ellos se incluyen la localización, el clima, la hidrología, la geología y la fisiología geoquímica de la cuenca. El clima de una región está influenciado por la altura del relieve, presentando características que lo diferencian del resto de las zonas montañosas y costeras(Sánchez et al., 2002).

El 50% del área de la cuenca están en la zona de precipitaciones mayores a 1900 mm y el valor medio de la lluvia anual calculado para una serie de muchos años de observación es de 1890 mm siendo este valor muy superior a los valores medios registrados para las provincias de Cienfuegos y Villa Clara (1510-1326 mm) respectivamente. Por la ubicación del embalse a unos 600 m de altura y un relieve montañoso hacen que las temperaturas ambientales sean bajas. Las temperaturas medias ambientales en el verano nunca alcanzan valores superiores a 26°C, registrándose valores medios de 23,50°C inferior al promedio medio anual histórico de la provincia de Villa Clara(Molina and Sanchez, 1993).

### **Precipitaciones**

El régimen de lluvias sigue un patrón bimodal característico del trópico húmedo, con un período de máximas precipitaciones de mayo a octubre y un período con menores precipitaciones de noviembre a abril(Sánchez et al., 2002).

Los aguaceros característicos de la cuenca son de origen orográfico, producidos por la elevación vertical de las masas de aire húmedo, que al chocar las laderas de las montañas, provocan lluvias de gran intensidad y de corta duración. Las intensidades de lluvia que se registran en la cuenca son elevadas, registrándose en algunos casos valores puntuales de intensidades mayores de 2 mm/min, lo cual ha sido, indudablemente un factor muy importante en los procesos erosivos y de mineralización de las aguas de la cuenca(Molina and Sanchez, 1993).

### **Evaporación**

Inversamente a lo observado en la lluvia, el fenómeno de evaporación que se presenta en la cuenca Hanabanilla, en porciones menores que en el resto de las regiones de las provincias de Cienfuegos y Villa Clara. En la lámina media de evaporación para la cuenca aparecen bajos valores en cada mes del año y la aparición de máximos en los meses de marzo a mayo y de mínimos hacia el final y principio del año (Molina and Sanchez, 1993).

### **Vientos**

La dirección de los vientos que se registran en el embalse presentan una regularidad muy elevada predominando la de los rumbos ESE a SSE, esto se debe funcionalmente a la orientación sureste-noroeste del eje principal del embalse y a que se encuentra rodeado de altas montañas, lo que provoca un efecto de encajonamiento de las corrientes de aire que determinan su constancia en una dirección específica (Sánchez et al., 2002).

Un aspecto muy importante a considerar, por sus posibles implicaciones sobre la dinámica del movimiento de las masas de agua, es la velocidad de los vientos que se observan anualmente en el embalse, las cuales resultan menores a las medias registradas en otros embalses ubicados en zonas llanas de la región incluso a las medias de Topes de Collantes. Los máximos de velocidad tienen lugar en los meses correspondidos de enero a mayo, coincidiendo con el período de mezcla del embalse, aunque los mayores valores aparecen en los meses de mayo y abril, meses en que por lo general el embalse presenta una estratificación térmica incipiente, lo que induce al razonamiento de que el viento no es el componente más importante en el proceso de mezclado de esta masa de agua (Molina and Sanchez, 1993).

### **Temperatura Ambiente**

La ubicación de la cuenca del embalse sobre los 600,0 m de altitud y el relieve francamente montañoso, hace que las temperaturas ambientales que tienen lugar en ellas sean bajas. Es de destacar que las temperaturas medias no alcanzan en ningún

momento los 26°C, y su promedio anual es de 23,5°C, muy inferior que la provincia de Villa Clara(Sánchez et al., 2002).

Dentro de las variables que componen los aspectos climáticos para el embalse Hanabanilla, resultan de gran importancia la temperatura ambiente y las precipitaciones, estas últimas tanto por su intensidad, debido a su efecto erosivo, como por su cantidad, a causa del lavado de nutrientes de la cuenca(Molina and Sanchez, 1993).

### **Régimen de explotación**

Otro de los factores de gran incidencia en el comportamiento del estado trófico de un embalse es su régimen de explotación. El embalse Hanabanilla ha sufrido apreciables fluctuaciones en sus volúmenes, debiéndose a la combinación de dos factores: a las sostenidas y elevadas extracciones y a la disminución progresiva del escurrimiento que en la mayoría de los casos ha sido inferior al escurrimiento medio anual de 153 millones de m<sup>3</sup>, calculado para la cuenca, como consecuencia de la necesidad de generación de energía eléctrica y disminución de las precipitaciones(Molina and Sanchez, 1993).

A pesar de que en el estado del embalse han incidido los factores antes señalados, el peso fundamental ha recaído en la sobreexplotación de éste, que se evidencia en las entregas realizadas que han sido superiores a las posibles entregas planificadas para cada año, donde fueron consideradas las reservas disponibles y pronóstico hidrológico(Sánchez et al., 2002).

Se realizó una revisión bibliográfica concluyendo que en Cuba se monitorean los principales componentes de los balances hídricos a través de la metodología establecida por el INRH. Además se dispone información sobre los parámetros que influyen en la calidad del agua y el procedimiento para la evaluación de estas mediante el ICA.

## Capítulo 2: Materiales y Métodos

El presente estudio corresponde a la investigación efectuada en la Empresa de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de Villa Clara con el fin de evaluar la posible influencia de las variaciones del nivel del agua sobre la calidad del agua del embalse Hanabanilla. Para ello se contó con el apoyo de los especialistas de dicha empresa y con todo el material e información contenido en las bases de datos de la entidad.

### 2.1 Análisis de los parámetros morfométricos de los embalses

Los parámetros morfométricos del embalse Hanabanilla se obtuvieron de la Empresa de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Estos parámetros fueron revisados y parámetros adicionales fueron calculados.

Los diversos Parámetros morfométricos que se pueden determinar a partir de un mapa batimétrico detallado (Wetzel, 1981). A continuación se define tan solo aquellos parámetros de uso más corriente.

**Longitud Máxima (l):** es la distancia en línea recta, entre los 2 puntos más distantes de la orilla del lago. Estadísticamente representa la longitud máxima de agua continua de la superficie del lago con la cual puede interactuar el viento.

**Anchura o amplitud máxima (b):** Corresponde a la distancia máxima entre las orillas del lago, en ángulo recto con la línea de longitud máxima. La anchura media (b) es igual al área dividida por la longitud máxima.

$$- (1)$$

**Área (A):** El área de la superficie y de cualquier curva de nivel situada a una profundidad z.

**Volumen (V):** El volumen de la cubeta corresponde a la integral de las áreas de cada estrato a profundidades sucesivas, tomadas desde la superficie hasta la profundidad máxima. El volumen puede estimarse sumando una serie de conos truncados, correspondientes a cada uno de los estratos:

$$- \frac{\text{---}}{\sqrt{\quad}}$$

Donde  $h$  es la altura del estrato, comprendida entre  $A_1$  y  $A_2$ ,  $A_1$  el área de la superficie superior y  $A_2$  el área de la superficie inferior del estrato cuyo volumen se va a determinar.

**Profundidad Máxima ( $Z_m$ ):** la profundidad mayor del lago.

**Profundidad media ( $Z$ ):** es el volumen del lago dividido x el área superficial

$$- \quad (2)$$

**Perímetro ( $L$ ):** La línea de intersección de la tierra con el agua es prácticamente constante en la mayoría de los lagos naturales. El perímetro sin embargo puede fluctuar enormemente en los lagos de vida efímera, sobre todo en embalses, a causa de las variaciones debidas a precipitaciones y descarga del agua.

## 2.2 Análisis del Balance Hídrico

Los datos del balance hídrico se obtuvieron a partir de los datos, dichos datos se obtienen según la siguiente metodología.

### Metodología para la determinación del balance hídrico en los embalses en Cuba(Martínez, 2003)

Se llama balance hídrico precisado aquel que cumpla con todos los requisitos establecidos en la presente metodología, de manera que pueda lograrse una medición del escurrimiento superficial con una calidad satisfactoria.

El cálculo del balance hídrico precisado será realizado en embalses seleccionados en función de una serie de criterios generales y prácticos, que enumeramos a continuación:

- 1) Que haya necesidad de conocer el escurrimiento real en el punto de ubicación del embalse en cuestión. Este análisis se hará tomando como base fundamental el diseño de la Red Hidrológica Nacional y necesidades locales.
- 2) Que los embalses seleccionados existan o puedan crearse todas las condiciones necesarias para medir con exactitud o calcularse indirectamente con suficiente calidad, todos los elementos que comprenden las pérdidas y aportes del balance hídrico. Esto significa que pueda implantarse una infraestructura adecuada en lo que

respecta a instalación de equipos (pluviómetro, pluviógrafo, evaporímetro, etc.) y que todas las entradas y entregas puedan medirse convenientemente sobre la base de soluciones hidrométricas.

- 3) Que se encuentren confeccionadas con exactitud las curvas características del embalse ( $W$  y  $A = f(H)$ ) debiendo tomarse medidas para que las mismas puedan ser revisadas cada 5 ó 10 años, en función de las posibilidades de azolvamiento, haciendo una topografía del vaso.
- 4) Que se efectúe, además, una topografía al aliviadero, no debiéndose aceptar los datos de proyectos.
- 5) Que los aportes o pérdidas de agua subterránea no sean significativas, debiendo existir un equilibrio entre estos así como entre las afluencias y efluencias que se producen en las orillas del embalse durante las variaciones de nivel.

#### Ecuación general de balance hídrico

Se partirá de la ecuación:

(3)

Dónde:

$\pm \Delta W$  = variaciones de los volúmenes acumulados

$E$  = suma de los aportes medidos

$S$  = suma de las entregas medidas

$\pm \delta (e - s)$  = componentes de entradas y salidas que no fueron medidas, incluye los errores de medición y cálculos de los componentes medidos

Siendo los aportes

(4)

Dónde:

$P$  = precipitaciones caídas sobre el espejo del embalse

$E_1$  = condensación del vapor de agua en el embalse

$Y_R$  = escurrimiento del río principal

$Y_L$  = escurrimiento lateral (de ríos pequeños y áreas entre los ríos)

$Y_T$  = aguas trasvasadas al embalse

$Y_S$  = escurrimiento subterráneo

$F_1$  = retorno del agua infiltrada por las márgenes del vaso debido a las variaciones de niveles del embalse.

Mientras que las salidas serán:

(5)

Dónde:

$E_2$  = evaporación desde la superficie del embalse

$U$  = extracciones o entregas de agua para usos múltiples a través de compuertas, válvulas, conductoras, estaciones de bombeo y motobombas

$U_g$  = fugas a través de compuertas, válvulas de obra de toma o aliviaderos de compuertas

$F$  = filtraciones en la zona del conjunto hidráulico

$V$  = vertimiento a través de los aliviaderos

$Y_f$  = efluencia subterránea a través del vaso del embalse

$F_2$  = infiltración lateral debido al efecto de variación de niveles del embalse durante la regulación

En las ecuaciones (4) y (5) podemos no considerar los términos  $E_1$ ,  $Y_S$ ,  $F_1$ ,  $U_g$ ,  $Y_f$ , y  $F_2$  debido a su insignificancia con respecto al volumen total o a que se compensan unos a otros. Así, si con las restantes variables podemos sustituir en (1), nos queda:

(6)

En el caso de que no se midan  $Y_R$ ,  $Y_L$  y  $Y_T$  la ecuación que daría:

(7)

Quedando incluidos en  $\pm \delta$  ( $e - s$ ), siendo esta la incógnita fundamental de la ecuación de balance. En el caso de que se midan estas variables habría primeramente que agregarlas a la ecuación (5) como una resta para obtener el resultado final:

(8)

Completándose el balance.

### **Cálculo de los componentes del balance hídrico**

#### **Precipitaciones**

De existir solamente un pluviómetro que caracterice la lluvia caída en el espejo del embalse, la lluvia diaria se calculará por la fórmula:

(9)

Dónde:

$W_P$  = volumen de lluvia diaria ( $10^3 \text{ m}^3$ )

$A$  = área del espejo del embalse correspondiente al nivel medio de éste durante el día ( $\text{km}^2$ )

$P$  = lámina promedio de lluvia caída en el pluviómetro (mm)

De existir más de un pluviómetro,  $P$  sería la media de todos ellos y se aplicaría la misma fórmula.

#### **Escurrimiento**

Si existe una estación hidrométrica en el río principal, el escurrimiento se medirá diariamente por los medios y métodos conocidos, los cuales no se repetirán aquí. En el caso que dicha estación se encuentre alejada del embalse, el escurrimiento del área complementaria entre ambos se calcularía por la fórmula:

(10)

Dónde:

$Q_b$  = gasto del área complementaria ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$q$  = módulo de escurrimiento líquido en la estación hidrométrica ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ )

$A_b$  = área complementaria ( $\text{km}^2$ )

La suma de los gastos  $Q_a$  y  $Q_b$  (el correspondiente al área hasta la estación de aforos y el del área complementaria respectivamente) dará el escurrimiento del río principal  $Y_R$ .

El escurrimiento lateral se calculará por la misma ecuación (10) asumiendo el mismo módulo de escurrimiento ( $q$ ) para los ríos secundarios que desembocan directamente en el embalse. La suma de todos estos aportes dará dicho escurrimiento  $Y_L$ . Por supuesto, en este último caso se parte de la base que las condiciones físico geográficas de todas estas áreas son semejantes a la del río principal, de lo contrario habría que hacer mediciones directas en estos afluentes. El caudal aportado producto de las aguas trasvasadas  $Y_T$  se obtendrá por mediciones directas de las entregas.

El valor final se dará en unidades de  $10^3 \text{ m}^3$ .

### **Evaporación**

Se calculará basándose en las mediciones hechas en el evaporímetro clase A instalado en el embalse o en un punto cercano con condiciones climatológicas similares. La fórmula general a emplear será la siguiente:

(11)

Dónde:

$W_e$  = volumen de evaporación diario ( $10^3 \text{ m}^3$ )

$A$  = área del espejo del embalse correspondiente al nivel medio de éste durante el día ( $\text{km}^2$ )

$C_e$  = coeficiente de reducción del tanque. Se tomará entre 0.75 y 0.80 (para nuestros cálculos se toma 0.80).

### **Extracciones**

Las entregas por medio de obras de toma deberán obtenerse de los modelos de control de las extracciones por la obra de toma en embalses, que se lleva en cada presa por personal técnico. Las extracciones de las estaciones de bombeo que toman directamente del vaso del embalse o de los ríos que lo alimentan (motobombas), así

como aquellas debidas a estaciones de bombeo de varios equipos, se tomarán igualmente de los modelos establecidos al efecto.

Los datos así obtenidos se anotan en las columnas correspondientes del modelo 2, donde se realizará la suma total de las extracciones.

### **Filtraciones**

Se determinarán instalando pequeñas obras hidrométricas, como vertedores triangulares, etc. Dichos datos se obtendrán del modelo resumen de filtraciones, que se lleva en la obra.

### **Vertimientos**

Para calcular correctamente los vertimientos tendrán que cumplirse dos condiciones fundamentales, que son las siguientes:

- 1) Que se tomen de manera precisa y sistemática la hora inicial y final de los vertimientos, además de otras lecturas de escalas intermedias indispensables.
- 2) Que se disponga de una topografía correcta y actualizada del aliviadero.

Para el cálculo de los vertimientos se aplica la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{---}}{\Sigma} (12)$$

Dónde:

Q = gasto medio del intervalo de tiempo calculado (m<sup>3</sup>/s)

T<sub>t</sub> = tiempo total de intervalo

Siendo el volumen igual a:

$$\text{---} (13)$$

### **Cálculo del nivel medio diario**

Si la variación de niveles en el embalse durante el día (7:00 a 7:00) es menor o igual a 10 cm, el nivel medio diario se calcula como el promedio aritmético de las tres lecturas diarias efectuadas.

————(14)

Siendo H el nivel medio diario del día en cuestión.

### **2.2.1 Determinación de niveles de agua del embalse Hanabanilla.**

Los niveles de agua del embalse Hanabanilla se obtuvieron a partir de la recopilación y el análisis de los datos, los cuales se calcularon según los balances hídricos tomados el primer día de cada mes, los cuales se muestran en los anexos .

Los datos de los niveles se analizaron y graficaron en excel. Se calculó la diferencia de niveles y sus cambios más bruscos, y se analizaron las posibles causas de estos cambios, interpretando la información en los balances hídricos.

### **2.2.2 Determinación del comportamiento de los niveles del embalse en base a los componentes de los balances hídricos del embalse Hanabanilla.**

A partir de la recopilación y el análisis de los datos, referidos a los volúmenes, las evaporaciones, las extracciones, las filtraciones, los vertimientos y los escurrimientos de agua del embalse Hanabanilla, en los años 2006 hasta 2016, tomados el primer día de cada mes.

Se correlacionaron los datos de cada parámetro en el programa de computación especializado Statgraphics Centurion XV (XV, 2007).

El programa de computación especializado Statgraphics Centurion XV brinda un resumen estadístico en el que a cada parámetro le hace un recuento de los datos le calcula el promedio, el valor máximo, el valor mínimo, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Además correlaciona cada una de las variables en función de las demás; y, el rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a 1, los valores abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%; estos valores se muestran de color rojo y los valores que dan una relación de 0,0000 son los más confiables.

Se estableció el período del 2006 al 2016 por la disponibilidad de los datos y por estar en un período de tiempo reciente a la actualidad.

## **2.3 Análisis de la calidad del agua del embalse Hanabanilla**

A partir de la recopilación y el análisis de los datos, referidos a los parámetros de calidad del agua del embalse Hanabanilla en el período establecido tomados el primer día de cada mes.

Estos datos se establecieron en la estación de monitoreo frente a la obra de toma a una profundidad máxima de 37,5m. La toma de muestra en el embalse se realizó con ayuda de un Batómetro Ruttner de 2 litros de capacidad tomándose muestras integradas cada 4 metros a todo lo largo del perfil de profundidad. También se tomaron muestras puntuales cada 2 metros a todo lo largo del perfil de profundidad. Las determinaciones analíticas se realizaron en el Laboratorio de Aguas de la DPRH-VC, utilizándose las técnicas establecidas en el Standard Methods (1985) y en el Methods de Chemical Analys de la Universidad de Uppsala Suecia.

Para determinar la calidad del embalse Hanabanilla se utilizó el cálculo del ICA, por ser un índice que refleja en un solo parámetro la calidad del agua.

### **2.3.1 Algoritmo propuesto para el cálculo del ICA.**

A partir de la recopilación y el análisis de los datos, referidos a los parámetros de calidad del agua del embalse Hanabanilla en los años 2006 hasta 2016 tomados el primer día de cada mes; se tomaron los datos de la demanda química de oxígeno, oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica, los coliformes fecales y la temperatura del agua que son los parámetros que se toman para la determinación del ICA. Además de estos parámetros también se necesitaron datos del embalse como el punto norte y el este del embalse y la altura de la estación.

Para el cálculo del ICA se utilizó una hoja Excel con sus especificaciones, la que es empleada para facilitar las evaluaciones, en la que se pusieron los datos requeridos y se obtuvo un resultado final del ICA para cada mes con un valor numérico que arroja un resultado cualitativo que varía de excelente calidad a altamente contaminada.

Para que el agua se pueda calificar como agua potable de acuerdo a los parámetros que rige la Norma Cubana 827-2012 Agua Potable - Requisitos Sanitarios el valor del ICA debe ser mayor que 80.

La metodología para el cálculo del ICA es la siguiente(Díaz, 2014):

El ICA es la sumatoria de los pesos relativos de cada indicador multiplicado por el valor de calidad obtenido mediante cada función matemática de relación y responde a:

(15)

Dónde  $\sum$

i: indicador de calidad, del 1 al 5.

$W_i$ : peso relativo de cada indicador

$q_i$  : valor en % obtenido de las funciones matemáticas de correlación

Los indicadores y su respuesta a impactos de contaminación pueden verse en la tabla 2.3

**Tabla 2.3 Indicadores de calidad de las aguas considerados en el ICA**

No.	Indicador	Comentarios
1	pH (pH).	Acidez o basicidad.
2	Conductividad eléctrica (CE)	Contenido de sales solubles o salinidad.
3	Oxígeno disuelto % saturación (ODSAT)	Estado del cuerpo de agua con respecto a su contenido de oxígeno disuelto.
4	Demanda química de oxígeno, método del dicromato (DQO).	Materia orgánica presente. .
5	Coliformes Termotolerantes o fecales (CF).	Densidad de bacterias fecales.

El valor cuantitativo de los indicadores varía según rangos típicos para aguas limpias y pudieran experimentar cambios negativos de acuerdo con el impacto de las descargas de aguas residuales sean domésticas, agropecuarias, industriales o de otro tipo en los cuerpos receptores.

En la tabla 2.3.1 se pueden ver los pesos relativos dados a cada indicador.

**Tabla 2.3.1 Pesos relativos de los indicadores del ICA**

<b>No.</b>	<b>Indicador</b>	<b>Pesos relativos</b>
1	pH (pH)	0.10
2	Conductividad eléctrica (CE)	0.10
3	Oxígeno disuelto % con respecto a la saturación (ODSAT)	0.30
4	Demanda química de oxígeno (DQO)	0.25
5	Coliformes fecales (CF)	0.25
	<b>Sumatoria</b>	<b>1.00</b>

Como se observa, al pH y CE se le otorga una menor importancia y de ahí el peso relativo asignado. A la DQO y CF, se le asignan mayores pesos relativos como indicadores de la contaminación orgánica y bacteriológica. Al oxígeno disuelto se le da el mayor peso relativo dado su importancia en el estado sanitario del cuerpo de agua superficial.

El procedimiento para hallar las funciones matemáticas de relación entre el valor del ICA y los indicadores es la confección de una tabla indicativa de la calidad y la utilización de un método de correlación lineal o de polinomios.

Las expresiones obtenidas son:

**pH (unidades)**

La ecuación es:

(16)

**CE (uS/cm)**

La ecuación es:

(17)

**Oxígeno disuelto ODSAT (%), ver oxígeno disuelto**

La ecuación es:

(18)

**DQO (mg/l)**

La ecuación es:

(19)

**CF (NMP/100 ml)**

La ecuación es:

(20)

El ODSAT, el % de OD presente con respecto a la saturación, refleja en mayor medida el estado cualitativo y de calidad del cuerpo receptor. Su ausencia o déficit,  $OD=0.00$ , se traduce en cuerpos receptores con aguas turbias, presencia de vegetación acuática, sólidos flotantes y malos olores, no aptas para los principales usos.

Se debe notar que matemáticamente el ICA puede dar un valor menor que cero o mayor de cien en el cálculo de las funciones de los indicadores, a valores menores que cero se infiere el valor es cero, a valores mayores de cien se infiere el valor es cien.

Hay que tener presente que el ICA no es un valor constante sino que representa la calidad del agua en el momento de la toma de muestra, resulta evidente que variara en dependencia del comportamiento del ciclo hidrológico en la cuenca, no es igual en época de seca que en época de lluvia, al igual refleja el impacto de la contaminación de acuerdo a las cargas contaminantes impuestas en los momentos del muestreo considerando su transporte a lo largo del río principal y sus afluentes.

### **2.3.2 Análisis de los parámetros que influyen en el ICA**

A partir de la recopilación y el análisis de los datos la empresa de aprovechamiento hidráulico, referidos a los parámetros de calidad del agua del embalse Hanabanilla, como el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto, el DQO y los coliformes fecales y la temperatura de agua; en el período establecido tomados el primer día de cada mes.

Se correlacionaron los datos de cada parámetro en el programa de computación especializado Statgraphics Centurion XV (XV, 2007).

Estos datos también se analizaron en el programa de Estadística Descriptiva (Non Esperling, 2010).

En el programa de Estadística Descriptiva se introducen los datos y las normas para que el agua se pueda calificar como agua potable de acuerdo a los parámetros que rige la Norma Cubana 827-2012 Agua Potable - Requisitos Sanitarios de cada parámetro; y, calcula estadísticas descriptivas de las concentraciones, en las que muestra valores como las medias, las variaciones estándar y los porcentajes; también realiza el porcentaje en cumplimiento de la norma para cada parámetro; los histogramas de concentración para cada parámetro; la distribución de frecuencias acumuladas para cada parámetro; y, las series temporales a las que se le realizaron una media de niveles de 4 meses.

Para que el agua se pueda calificar como agua potable de acuerdo a los parámetros que rige la Norma Cubana 827-2012 Agua Potable - Requisitos Sanitarios el valor del pH debe ser de 6,5 a 8,5; la conductividad eléctrica debe ser menor que  $800 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ , el oxígeno disuelto debe ser mayor que  $4\text{mg}/\text{L}$ ; la demanda química de oxígeno debe ser menor que  $14\text{mg}/\text{L}$  y los coliformes fecales deben ser menores que 100.

#### **2.4 Análisis de los niveles del embalse con el ICA**

Para la relación de los niveles del embalse con el ICA los datos obtenidos anteriormente se realizaron una graficas de ambas variables para ejecutar un análisis cuantitativo y se correlacionaron dichos datos en el programa de computación especializado Statgraphics Centurion XV

Según la recopilación de información se seleccionó del periodo de estudio. Además se realizó un procesamiento de la información recopilada en los balances hídricos y cálculo de los niveles y un procesamiento de la información recopilada en los parámetros de calidad y cálculo del ICA. También se evaluó de la posible correlación de los niveles con respecto al ICA.

## Capítulo 3 Resultados y sus análisis.

### 3.1 Cálculo de los parámetros morfométricos del embalse Hanabanilla

A partir de la recopilación y evaluación de los datos obtenidos de la Empresa de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos se obtuvieron los parámetros morfométricos del embalse Hanabanilla, los cuales se analizaron y se recalcularon según la metodología analizada.

En la tabla 3.1 se muestran los parámetros morfométricos del embalse Hanabanilla

**Tabla 3.1 Parámetros morfométricos del embalse Hanabanilla**

<b>Parámetros</b>	<b>U.M.</b>	<b>Valor</b>
Largo Máximo (l)	km	17.8
Ancho Máximo (b)	km	1
Área (Ac)	km <sup>2</sup>	18.8
Volumen (V)	hm <sup>3</sup>	292.0
Profundidad Máxima (Zm)	m	43.0
Profundidad Media (Z)	m	15.5
Línea de borde (L)	km	75.0

### 3.2 Comportamiento de niveles de agua del embalse Hanabanilla

#### Análisis general de los niveles del embalse del año 1975 al 2016

En el anexo 12 presentan los niveles del embalse para el primer día de cada mes entre los años 1975 hasta el año 2016, los datos se obtuvieron de los balances hídricos.

Los niveles de agua del embalse Hanabanilla varían en dependencia del volumen del agua, las entradas de agua al embalse proviene de las lluvias y el escurrimiento de estas mismas; y, de la salida por evaporación, filtración, vertimientos y extracción.

El promedio de la diferencia de niveles del embalse es de 0,003 m es decir que cada mes aproximadamente el embalse aumenta 3 mm de su nivel.

Los cambios más bruscos de niveles se originan por fenómenos naturales principalmente por intensas lluvias y sequías, aunque también influye la necesidad de la extracción del agua el consumo de la población y para generar energía eléctrica.

A continuación se muestra un ejemplo del cambio nivel del embalse:

En enero del año 1975 el nivel del embalse fue de 351,17 m y en febrero de ese mismo año fue de 350,49 m por lo que la diferencia de nivel fue de -0,68 m; el volumen inicial del mes de enero fue de 83,700 hm<sup>3</sup> y el de febrero fue de 76,9 hm<sup>3</sup>, el cual también disminuyó; la evaporación del mes de enero fue de 1,111 hm<sup>3</sup>, la extracción de agua fue de 10,854 hm<sup>3</sup>, la filtración fue de 0,011 hm<sup>3</sup>, el vertimiento fue de 0 y el escurrimiento fue de 4,566 hm<sup>3</sup>.

Por lo que se puede llegar a la conclusión que si el agua de entrada al embalse es menor que la de salida el volumen disminuye y como el volumen es directamente proporcional al nivel de agua este también disminuye.

A continuación se muestran los cambios más bruscos de nivel y sus causas en cada caso:

En julio del año 1988 el embalse aumentó 6,87 m de su nivel debido a que en junio de ese mismo año, el mes anterior, hubo intensas lluvias, es decir que hubo más entrada de agua que de salida.

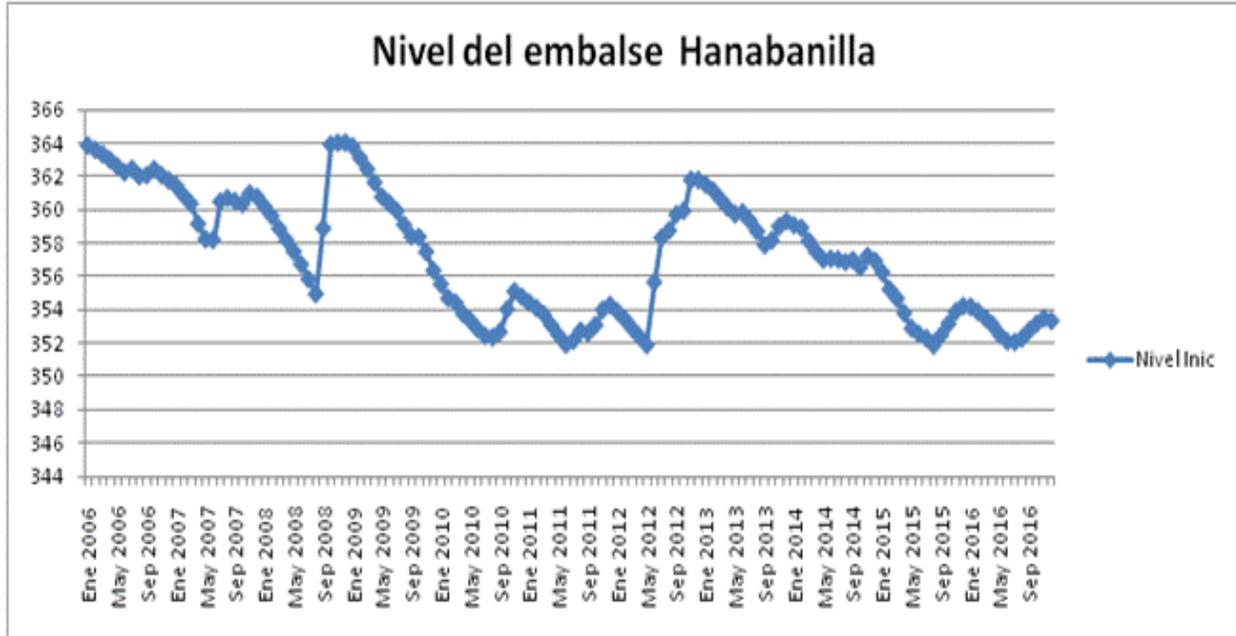
En febrero del año 2000 el embalse disminuyó 5,43 m de su nivel debido a que en enero de ese mismo año, el mes anterior, la extracción del agua fue mayor que las lluvias, es decir que hubo más salida de agua que de entrada.

Por lo que se puede llegar a la conclusión que los cambios bruscos de aumento de nivel son mayores que los de disminución de este mismo, esto es debido a las intensas lluvias o a fenómenos naturales como tormentas tropicales, ciclones o huracanes.

Además de existir cambios bruscos en el embalse también en algunos casos no hubo variación del nivel entre dos meses como por ejemplo en julio y agosto de 1979, en noviembre y diciembre de 1991, en setiembre y octubre de 1994, en julio; agosto; septiembre; octubre; noviembre y diciembre de 1996, y en junio y julio de 1999, esto quiere decir q en esos meses la cantidad de entrada de agua fue igual a la de salida.

Análisis del período establecido

En la figura 3.2 se presentan los niveles del embalse para el primer día de cada mes entre los años 2006 y 2016. Además, se obtuvieron y procesaron otros datos del balance hídrico para cada mes del período indicado.



**FIGURA 3.2 Variaciones de los niveles de agua en el embalse Hanabanilla del 2006 al 2016**

El promedio de la diferencia de niveles del embalse es de 0,08 m es decir que cada mes aproximadamente el embalse disminuye 80 mm de su nivel.

A continuación se muestran los cambios más bruscos de nivel y sus causas en cada caso:

En abril del año 2007 el embalse disminuyó 1,22 m de su nivel debido a que en marzo de ese mismo año, el mes anterior, la extracción del agua fue mayor que las lluvias, es decir que hubo más salida de agua que de entrada.

En octubre del año 2008 el embalse aumentó 5,03 m de su nivel debido a que en septiembre de ese mismo año, el mes anterior, hubo intensas lluvias, es decir que hubo más entrada de agua que de salida.

### 3.2.1 Determinación de los parámetros que influyen en los cambios de niveles del embalse Hanabanilla.

En la tabla 3.2.1 se muestra el resumen estadístico para cada una de las variables que conforman el balance hídrico.

**Tabla 3.2.1 Resumen Estadístico para los componentes del balance hídrico**

	Escurrem.	Nivel	Evaporac.	Extracc.	Filtración	Vertimien.	Volumen
Recuento	133	133	133	133	133	133	133
Promedio	9.54399	357.217	1.47445	10.9759	0.00018797	0.428865	163.634
Desviación Estándar	14,0623	3,68502	0,592594	4,21194	0,00065308	1,54973	61,0077
Coefficiente de Variación	147,341%	1,03159%	40,1908%	38,3745%	347,442%	361,356%	37,2831%
Mínimo	0.143	351.82	0.0	2.891	0.0	0.0	24.743
Máximo	107.359	364.0	3.03	21.439	0.006	6.963	286.0
Rango	107.216	12.18	3.03	18.548	0.006	6.963	261.257

La tabla 3.2.2 muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%.

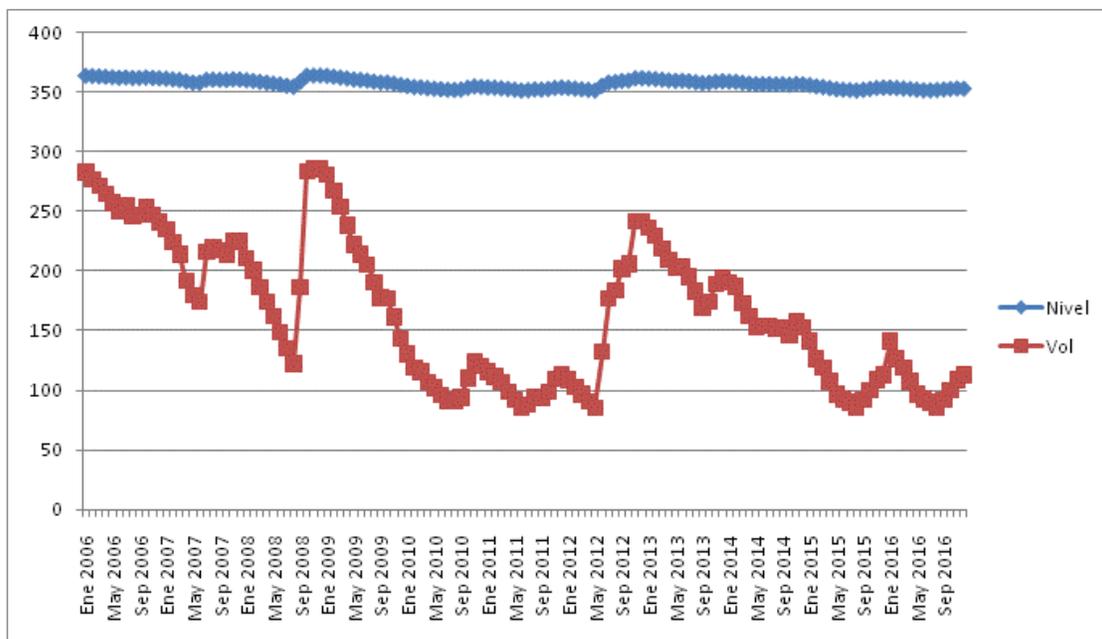
**Tabla 3.2.2 Correlaciones de los componentes del balance hídrico**

	Escurrecimiento	Nivel	Evaporación	Extracción	Filtración	Vertimiento	Volumen
Escurrecimiento		0.0089	-0.0658	0.1719	0.2080	0.1524	0.0063
		(133)	(133)	(133)	(133)	(133)	(133)
		0.9189	0.4518	0.0479	0.0163	0.0799	0.9423
Nivel	0.0089		0.5253	0.4839	0.3289	0.1755	0.9550
	(133)		(133)	(133)	(133)	(133)	(133)
	0.9189		0.0000	0.0000	0.0001	0.0434	0.0000
Evaporación	-0.0658	0.5253		0.4644	0.2181	-0.1169	0.5014
	(133)	(133)		(133)	(133)	(133)	(133)
	0.4518	0.0000		0.0000	0.0117	0.1803	0.0000
Extracción	0.1719	0.4839	0.4644		0.0912	0.1982	0.4277
	(133)	(133)	(133)		(133)	(133)	(133)
	0.0479	0.0000	0.0000		0.2966	0.0222	0.0000
Filtración	0.2080	0.3289	0.2181	0.0912		0.0503	0.3459
	(133)	(133)	(133)	(133)		(133)	(133)
	0.0163	0.0001	0.0117	0.2966		0.5654	0.0000
Vertimiento	0.1524	0.1755	-0.1169	0.1982	0.0503		0.1804
	(133)	(133)	(133)	(133)	(133)		(133)
	0.0799	0.0434	0.1803	0.0222	0.5654		0.0378
Volumen	0.0063	0.9550	0.5014	0.4277	0.3459	0.1804	
	(133)	(133)	(133)	(133)	(133)	(133)	
	0.9423	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0378	

Estos resultados indican que el factor de más peso en la variación de los niveles del embalse es el volumen, aunque también tiene relación con la extracción, la evaporación, la filtración y el vertimiento.

Además existe una relación entre el escurrecimiento y la extracción, el escurrecimiento y la filtración, la evaporación y la extracción, la evaporación y la filtración, la evaporación y el volumen, la extracción y el vertimiento, la extracción y el volumen, la filtración y el volumen, el vertimiento y el volumen.

En la figura 3.2 se muestran las variaciones de los niveles del embalse con los volúmenes del período analizado.



**FIGURA 3.2 Relación de los niveles con los volúmenes del embalse Hanabanilla**

En esta gráfica se puede observar que al aumentar o disminuir el volumen el nivel respectivamente aumenta o disminuye.

### 3.3 Calidad del agua del embalse Hanabanilla

La calidad del agua del embalse Hanabanilla se obtuvo mediante el cálculo del ICA. En la tabla 3.3 se muestran las clasificaciones de las aguas con respecto a los valores del ICA.

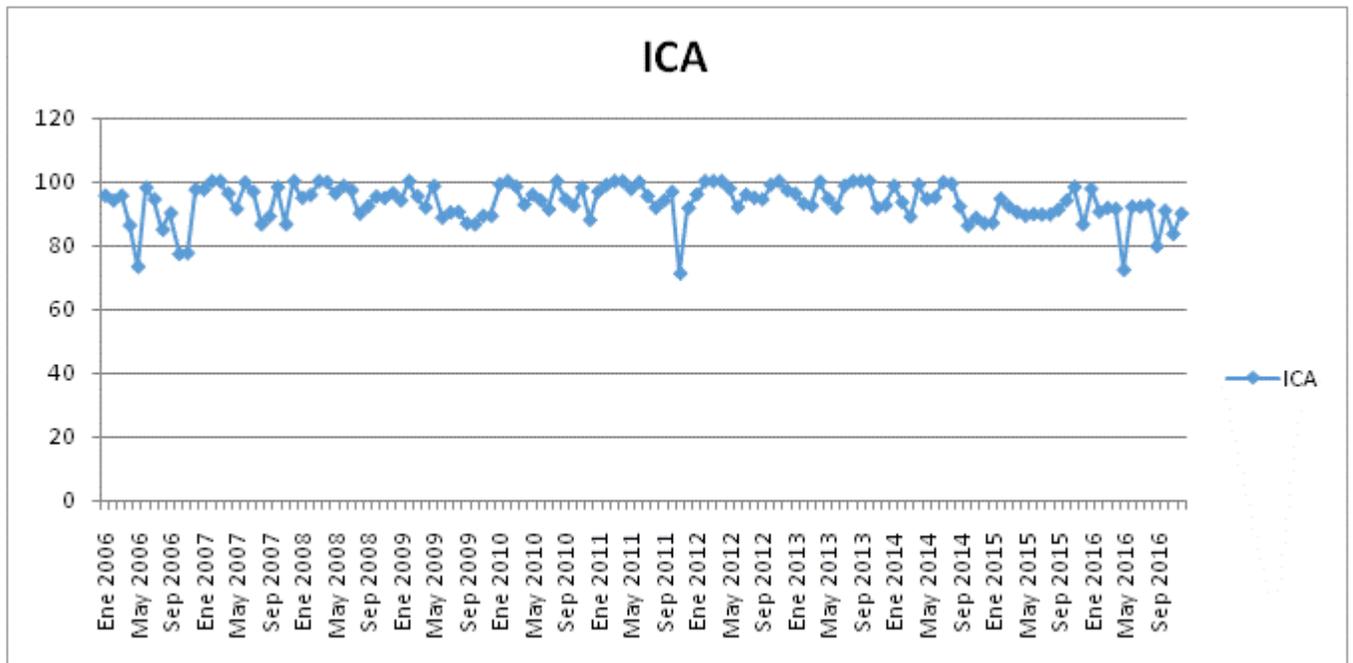
**Tabla 3.3 Clasificación de los valores del ICA**

Clase	Rango de valores del ICA	Clasificación	Colores para representar
1	90.00-100.00	Excelente calidad (EX)	Azul intenso
2	89.99-80.00	Aceptable calidad (A)	Verde
3	79.99-70.00	Medianamente contaminada (MC)	Amarillo
4	69.99-60.00	Contaminada (C)	Anaranjada
5	Menor de 59.99	Altamente contaminada (AC)	Roja

### 3.3.1 Cálculo del ICA

En la siguiente gráfica se muestran las variaciones del ICA en el embalse Hanabanilla

**Grafica 3.3.1 Comportamiento del ICA en el embalse Hanabanilla desde 2006 hasta 2016**



Los valores del ICA en la mayoría de sus comportamientos son excelente calidad, y de aceptable calidad en algunos meses. En el embalse se muestran meses en los que el agua está medianamente contaminada como lo son por ejemplo mayo del 2006,

octubre del 2006, noviembre del 2006, noviembre del 2011, mayo del 2016 y septiembre del 2016.

### 3.3.2 Parámetros que influyen en los cambios del ICA

La tabla 3.3.2 muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma.

**Tabla 3.3.2 Resumen Estadístico de los componentes que influyen en los cambios del ICA y el ICA**

	<b>CE</b>	<b>CTT</b>	<b>DQO</b>	<b>ICA</b>	<b>OD</b>	<b>pH</b>
Recuento	132	132	132	132	132	132
Promedio	296,833	1,78485	2,86371	93,4361	5,39144	7,7278
Desviación Estándar	95,4864	1,44526	2,72836	5,82492	1,493	0,384798
Coefficiente de Variación	32,1684%	80,9738%	95,2736%	6,23412%	27,6921%	4,97939%
Mínimo	150,0	1,0	0,08	71,31	0,3	6,6
Máximo	1050,0	9,3	24,0	100,0	9,0	8,82
Rango	900,0	8,3	23,92	28,69	8,7	2,22

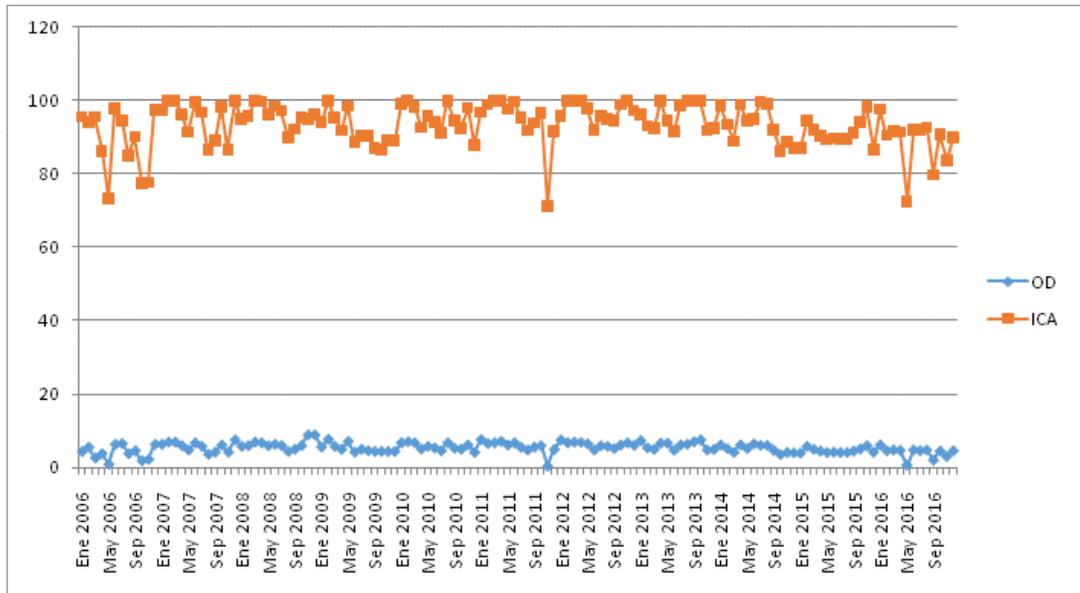
La tabla 3.3.3 se muestran las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%.

**Tabla 3.3.3 Correlaciones de los componentes que influyen en los cambios del ICA y el ICA**

	CE	CTT	DQO	ICA	OD	Calidad pH
CE		-0,0402	0,1328	0,0094	0,0442	0,0106
		(132)	(132)	(132)	(132)	(132)
		0,6475	0,1292	0,9152	0,6149	0,9043
CTT	-0,0402		0,1903	-0,1840	-0,2957	0,0113
	(132)		(132)	(132)	(132)	(132)
	0,6475		<b>0,0288</b>	<b>0,0347</b>	<b>0,0006</b>	0,8976
DQO	0,1328	0,1903		-0,2610	-0,2455	-0,1164
	(132)	(132)		(132)	(132)	(132)
	0,1292	<b>0,0288</b>		<b>0,0025</b>	<b>0,0045</b>	0,1839
ICA	0,0094	-0,1840	-0,2610		0,9068	0,2327
	(132)	(132)	(132)		(132)	(132)
	0,9152	<b>0,0347</b>	<b>0,0025</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,0072</b>
OD	0,0442	-0,2957	-0,2455	0,9068		0,2509
	(132)	(132)	(132)	(132)		(132)
	0,6149	<b>0,0006</b>	<b>0,0045</b>	<b>0,0000</b>		<b>0,0037</b>
pH	0,0106	0,0113	-0,1164	0,2327	0,2509	
	(132)	(132)	(132)	(132)	(132)	
	0,9043	0,8976	0,1839	<b>0,0072</b>	<b>0,0037</b>	

Estos resultados indican que el factor de más peso en el deterioro de la calidad el embalse es el oxígeno disuelto.

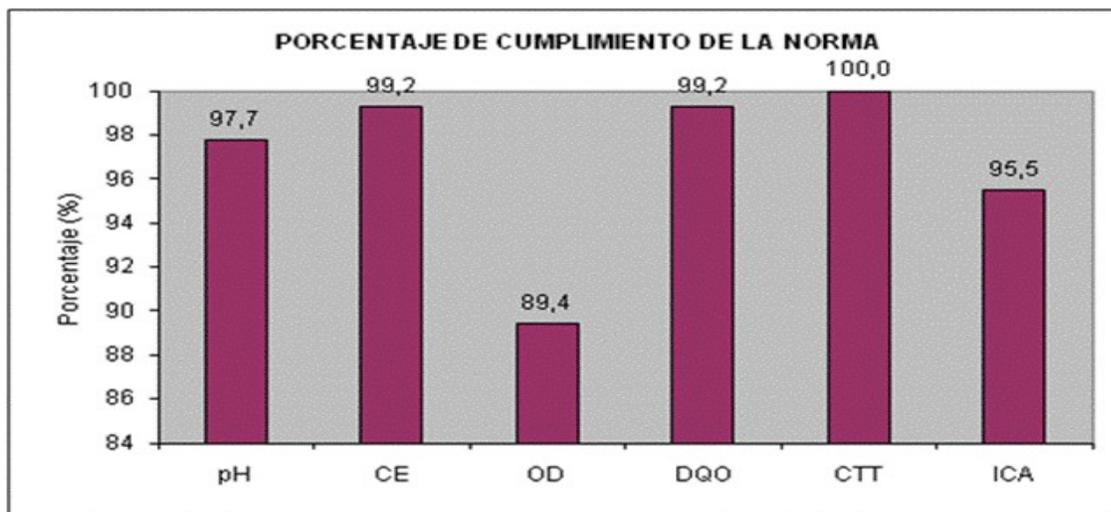
En la figura 3.3.2 se muestra la relación del ICA con el oxígeno disuelto.



**FIGURA 3.3.2** Relación de comportamiento del ICA con relación al oxígeno disuelto

Por lo que se llega a la conclusión que el parámetro que más influye en el comportamiento del ICA es el oxígeno disuelto.

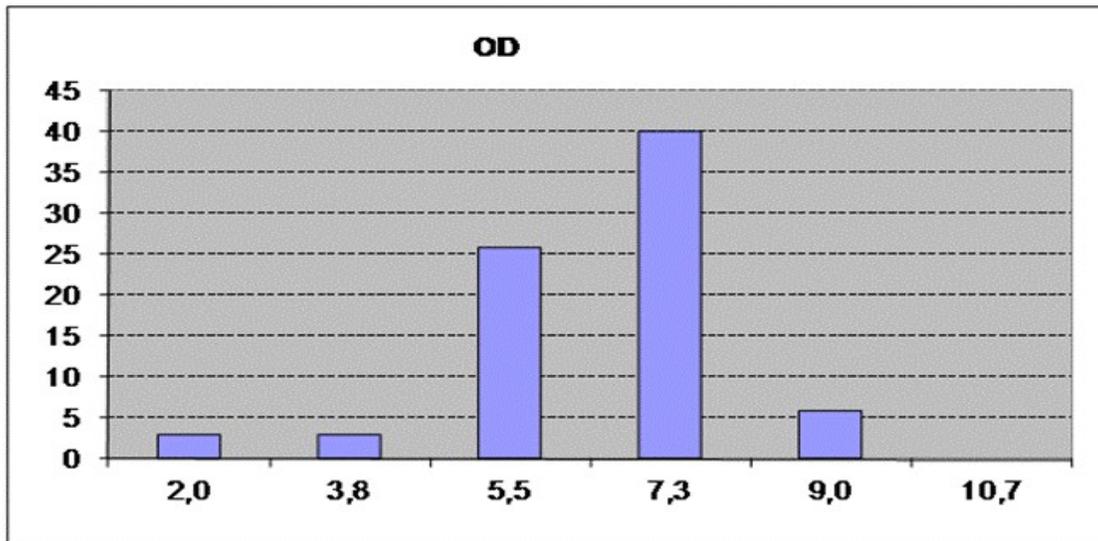
La figura 3.3.3 muestra el porcentaje del cumplimiento de la norma para todos los componentes del ICA y del ICA



**FIGURA 3.3.3** Porcentaje de los cumplimientos de las normas para los parámetros de calidad y el ICA

El parámetro con menor porcentaje es el oxígeno disuelto con un 10,6 por ciento de incumplimiento.

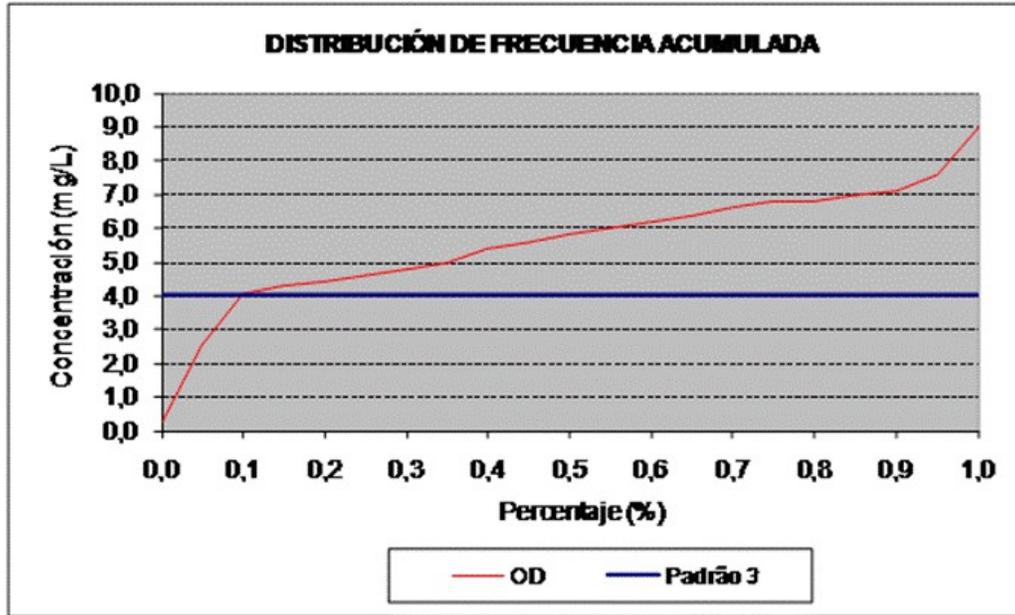
La figura 3.3.4 se muestran el histograma de distribución de frecuencias de concentraciones del oxígeno disuelto.



**FIGURA 3.3.4 Correlaciones del oxígeno disuelto**

En esta figura se observaron la cantidad de veces que el oxígeno disuelto tuvo un valor como por ejemplo oxígeno disuelto fue de 2mg/L tres veces y 3,8mg/L tres veces, 5,5mg/L veintiséis veces, 7,3mg/L cuarenta veces y de 9mg/L seis veces.

La figura 3.3.5 muestra la distribución de frecuencias acumuladas que está en función la cantidad de veces que el oxígeno disuelto.



Gráfica 3.3.5 Distribución de frecuencias acumuladas

En esta figura se observaron los porcentajes que incumplen las normas que son aproximadamente de un 10 por ciento.

En la figura 3.3.6 se muestra la serie temporal del oxígeno disuelto

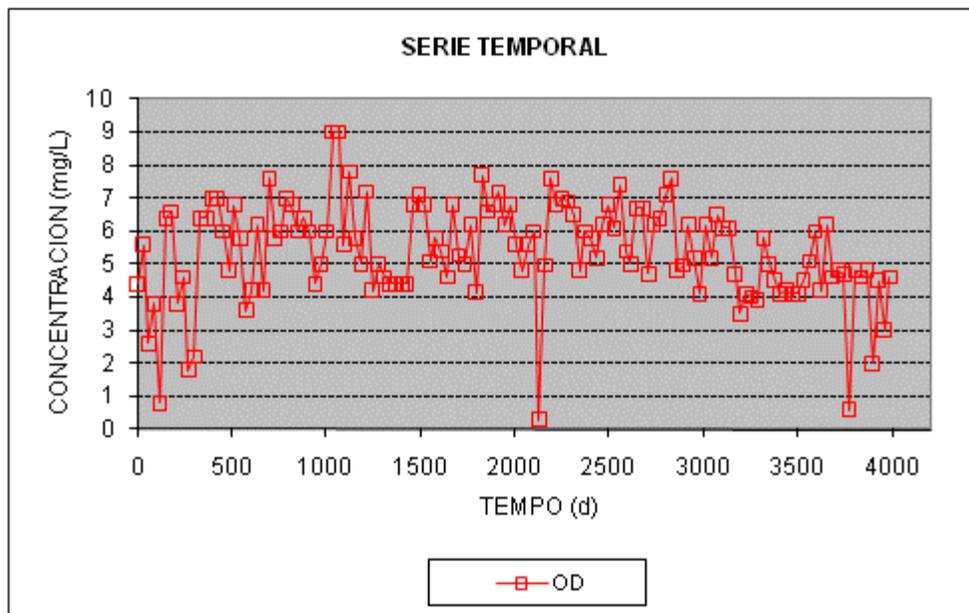
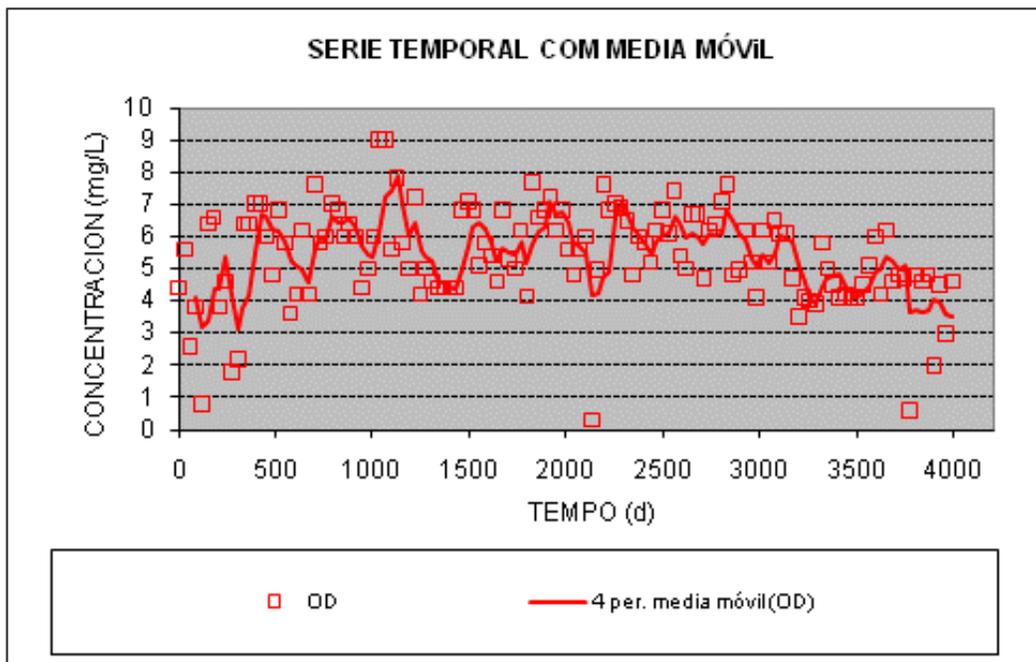


FIGURA 3.3.6 Serie temporal de la concentración del oxígeno disuelto

En esta gráfica se observaron las series temporales del oxígeno disuelto en este período.

En la figura 3.3.7 se muestra la serie temporal del oxígeno disuelto con una media móvil de 4 meses.



**FIGURA 3.3.7 Serie temporal de la concentración del oxígeno disuelto con media de 4 meses**

En esta figura se observaron las variaciones del oxígeno disuelto con una media móvil de 4 meses.

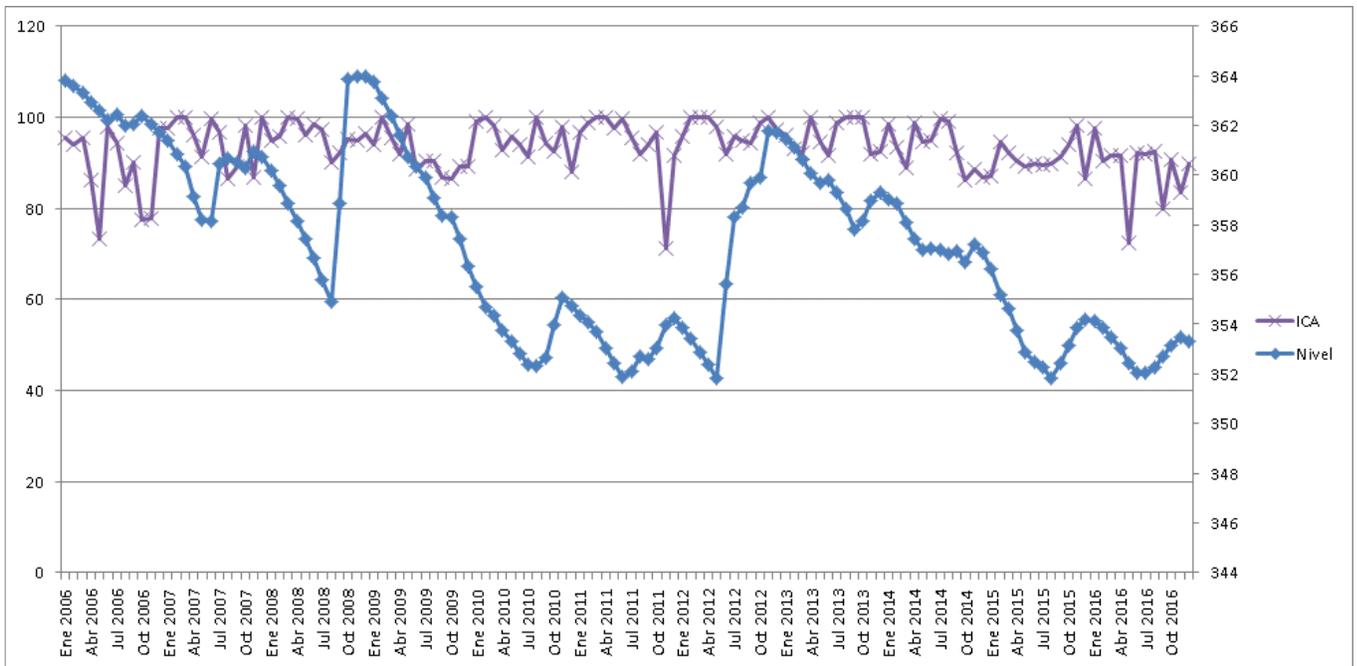
La tabla 3.3.4 muestra las estadísticas descriptivas de los parámetros que influyen en el cambio del ICA y también del ICA.

Tabla 3.3.4 Estadística descriptiva de los parámetros que influyen en la calidad del agua y del ICA

<b>Estadística Descriptiva</b>						
	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>OD</b>	<b>DQO</b>	<b>CTT</b>	<b>ICA</b>
<b>Número de datos</b>	132	132	132	132	132	132
<b>Media</b>	<b>7,7</b>	<b>296,8</b>	<b>5,4</b>	<b>2,9</b>	<b>1,8</b>	<b>93,4</b>
<b>Mínimo</b>	6,6	150,0	0,3	0,1	1,0	71,3
<b>Máximo</b>	8,8	1050,0	9,0	24,0	9,3	100,0
<b>Coef. Var</b>	0,050	0,322	0,277	0,953	0,810	0,062
<b>Medias</b>						
<b>Media</b>	7,7	296,8	5,4	2,9	1,8	93,4
<b>Mediana</b>	7,8	290,0	5,5	2,2	1,0	94,4
<b>Media geométrica</b>	7,7	287,2	5,1	2,1	1,5	93,2
<b>Variación</b>						
<b>Desviación estándar</b>	0,4	95,5	1,5	2,7	1,4	5,8
<b>Med - 1 desv. estan.</b>	7,3	201,3	3,9	0,1	0,3	87,6
<b>Med + 1 desv. estan.</b>	1,0	392,3	6,9	5,6	3,2	99,3
<b>Porcentajes</b>						
<b>10%</b>	7,2	230,0	4,0	0,8	1,0	86,7
<b>25%</b>	7,5	250,0	4,5	1,4	1,0	90,5
<b>50%</b>	7,8	290,0	5,5	2,2	1,0	94,4
<b>75%</b>	8,0	310,0	6,4	3,7	2,0	98,1
<b>90%</b>	8,1	350,0	7,0	5,1	2,0	100,0

### 3.4 Relación de los niveles del embalse con el ICA

En la figura 3.4 se muestra la relación de los niveles del embalse Hanabanilla con el ICA mensual del período estudiado.



**FIGURA 3.4 Relación de los niveles del embalse Hanabanilla con su ICA mensual**

Podemos apreciar que no se observa relación de los niveles con el ICA en la gráfica anterior.

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre el ICA y el nivel. La ecuación del modelo ajustado es:

$$(21)$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 0,0926035% de la variabilidad en Calidad ICA. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 5,84457. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 4,40023 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en

Análisis de la calidad del agua del embalse Hanabanilla según el comportamiento de los niveles de agua.

el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

Se intentó simplificar el modelo, pero no se obtuvo ninguna correlación significativa.

Por esto, se concluye que a partir de los datos disponibles no fue posible detectar dependencia entre las fluctuaciones de nivel del agua con respecto a la calidad del agua del embalse. Esto puede ser explicado por las características morfológicas del embalse ya que es muy profundo en zona de obra de toma, su patrón de estratificación térmica, la calidad y frecuencia de muestreo de calidad, entre otros aspectos.

## **Conclusiones y Recomendaciones**

### **Conclusiones**

- Con el estudio de las fuentes bibliográficas se establece el marco teórico de esta investigación abordando temas como el balance hídrico y el ICA, y herramientas computacionales como ayuda a los cálculos realizados.
- Se determinó el cumplimiento de las normas a partir de un análisis estadístico que incluye los porcentajes de las normas cubanas sobre la calidad del agua para uso potable.
- Después de realizar esta investigación se determinó que no se evidencia una relación cuantitativa entre la variación de los niveles de agua del embalse y el comportamiento del ICA debido a la limitación de datos y a las características del embalse ya que tiene varios comportamientos típicos.

### **Recomendaciones**

- Diseñar nuevas investigaciones para conocer el comportamiento de la relación entre estos parámetros.
- Realizar campañas de muestreo de la calidad del agua con una mayor frecuencia para disponer de mayor cantidad de datos avalada por un análisis económico.

## Referencias Bibliográficas

- 827:, N. 2012. Agua Potable, Requisitos Sanitarios.
- (INRH), I. N. D. R. H. 1991. METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DEL BALANCE HIDRICO PRECISADO EN LOS EMBALSES. Ciudad Habana.
- ALEXANDRA MOREIRA LÓPEZ, C. R. O. Y. 2016. Guía metodología para la elaboración de balances hídricos superficiales. *In: RIEGO, M. D. M. A. Y. A.-V. D. R. H. Y. (ed.)*. La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.
- BETANCOURT, C. R. 2012. *Calidad físicoquímica del agua en embalses cubanos*.
- CITMA 2007. La Estrategia Ambiental Nacional. *In: MINISTERIO DE CIENCIA, T. Y. M. A., LA HABANA (ed.)*. Marta Abreu 55 (altos) esquina Zayas. Santa clara. Villa Clara.
- CITMA 2011. El Cambio Climático y la zona costera cubana. *In: MINISTERIO DE CIENCIA, T. Y. M. A., LA HABANA (ed.)*.
- DÍAZ, L. J. B. G. 2014. MANUAL DE CÁLCULOS: ÍNDICE DE CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES.
- DUQUE, J. A. D. 2018. *El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad*. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- ECURED. 2018. *Embalse Hanabanilla* [Online].
- FIRE, C. 1986. *Water quality criteria the resource Agency of California*. .
- M, G. F. J. 2006. La institucionalización del manejo Integrado de Cuencas. *Voluntad Hidráulica*.
- M, G. F. J. 2007. Aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integrada de los recursos hídricos. *Voluntad Hidráulica, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), La Habana*.
- MABEL SEISDEDO, M. D., SINÁI BARCIA Y GUSTAVO ARENCIBIA 2014-2015. Análisis comparativo de la calidad del agua de dos embalses de la cuenca Arimao, Cuba. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras*.
- MARTÍNEZ, I. A. V. 2003. Metodología para la determinación del balance hidrico precisado en los embalses. *In: HIDRAULICOS, I. N. D. R. (ed.)*.
- MATTES, G. 1984. Hydrogeological criteria for the self purification of polluted groundwater 24 th international Geological Congress Montreal Canada
- MOACYR 2012. *Calidad de agua en embalses*.
- MOLINA, V. & SANCHEZ, R. 1993. Estudio del embalse Hanabanilla.
- MORENO, M. 2009. *ICA para el embalse Sagua la Grande*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- NON ESPERLING, M. 2010. Universidad Federal de Minas Gerais. *In: BRASIL (ed.)*.
- RODRÍGUEZ, F. 2006. Nuevos logros en el estudio de la pluviosidad en Cuba: Mapa Isoyético para el período 1961-2000. *Revista Voluntad Hidráulica*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Cuba.

SÁNCHEZ, R., MORENO, M. & ARIAS, R. 2002. Cuarto taller nacional de cuencas hidrográficas *Estudio limnológico del embalse hanabanilla*. Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos de Villa Clara.

SANDOVAL, W. 2018. *PRESAS Y EMBALSES*.

WETZEL, R. G. 1981. *limnología*.

WIKIPEDIA, L. E. L. *Embalses* [Online].

XV, S. C. 2007. Version 15.2.14.

## **Bibliografía:**

2017. Mantenimiento, conservación y explotación [Online].
2019. Norma técnica de seguridad para la explotación, las revisiones de seguridad y la puesta fuera de servicio de grandes presas
- 22:, N. 1999. Lugares de Baño en Costas y en Masas de Aguas Interiores, Requisitos Higiénico Sanitarios.
- . Oficina Nacional de Normalización (La Habana, Cuba).
- 25:, N. 1999. Evaluación de los Objetivos Hídricos de uso Pesquero. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización (La Habana, Cuba)
- 827:, N. 2012. Agua Potable, Requisitos Sanitarios.
- 1048:, N. 2014. Calidad del agua para preservar el suelo, Especificaciones. (INRH), I. N. D. R. H. 1991. METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DEL BALANCE HIDRICO PRECISADO EN LOS EMBALSES. Ciudad Habana.
- AGUA, C. N. D. 2007. MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO.
- ALEXANDRA MOREIRA LÓPEZ, C. R. O. Y. 2016. Guía metodología para la elaboración de balances hídricos superficiales. In: RIEGO, M. D. M. A. Y. A.-V. D. R. H. Y. (ed.). La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia.
- BETANCOURT, C. R. 2012. Calidad físicoquímica del agua en embalses cubanos.
- CITMA 2007. La Estrategia Ambiental Nacional. In: MINISTERIO DE CIENCIA, T. Y. M. A., LA HABANA (ed.). Marta Abreu 55 (altos) esquina Zayas. Santa clara. Villa Clara.
- CITMA 2011. El Cambio Climático y la zona costera cubana. In: MINISTERIO DE CIENCIA, T. Y. M. A., LA HABANA (ed.).
- CRUZ, E. R. D. L. 2019. Proposed scheme for the supply of drinking water to the municipalities Placetas and Fomento., Universidad Central "Marta Abreus" de Las Villas.
- DÍAZ, L. J. B. G. 2014. MANUAL DE CÁLCULOS: ÍNDICE DE CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES.
- DUQUE, J. A. D. 2018. El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.

- E., F. 2001. Investigaciones hidrogeológicas de Cuba. .
- ECURED. 2018. Embalse Hanabanilla [Online].
- FIRENZA, C. 1986. Water quality criteria the resource Agency of California. .
- MARTÍNEZ, G. F. J. 2006. La institucionalización del manejo Integrado de Cuencas. Voluntad Hidráulica.
- MARTÍNEZ, G. F. J. 2007. Aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integrada de los recursos hídricos. Voluntad Hidráulica, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), La Habana.
- MABEL SEISDEDO, M. D., SINAÍ BARCIA Y GUSTAVO ARENCIBIA 2014-2015. Análisis comparativo de la calidad del agua de dos embalses de la cuenca Arimao, Cuba. Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras.
- MARTÍNEZ, I. A. V. 2003. Metodología para la determinación del balance hidrico precisado en los embalses. In: HIDRAULICOS, I. N. D. R. (ed.).
- MATTES, G. 1984. Hydrogeological criteria for the self purification of polluted groundwater 24 th international Geological Congress Montreal Canada
- MOACYR 2012. Calidad de agua en embalses.
- MOLINA, V. & SANCHEZ, R. 1993. Estudio del embalse Hanabanilla. MONOGRAFÍAS Embalses.
- MORENO, M. 2009. ICA para el embalse Sagua la Grande. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- NON ESPERLING, M. 2010. Universidad Federal de Minas Gerais. In: BRASIL (ed.).
- P., B. 2015. La otra sequía. Periódico Granma.
- PAJARES, E. M. 2007. El uso y la tecnología de los recursos hídricos. Universidad Politecnica de Catalunya.
- R., F. J. 1990. Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales, efecto de los factores geológicos, hidrogeológicos y ambientales. Hidrogeología (Granada).
- RODRÍGUEZ, F. 2006. Nuevos logros en el estudio de la pluviosidad en Cuba: Mapa Isoyético para el período 1961-2000. Revista Voluntad Hidráulica. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Cuba.

RODRÍGUEZ, J. C., PÉREZ, R. M., GÓMEZ, L. M. & ÁLVAREZ, I. 2017. Evaluación química analítica y microbiológica de los embalses Chalons y Parada de Santiago de Cuba. Revista Cubana de Química. Santiago de Cuba, Cuba.

SÁNCHEZ, R., MORENO, M. & ARIAS, R. 2002. Cuarto taller nacional de cuencas hidrográficas Estudio limnológico del embalse hanabanilla. Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos de Villa Clara.

SANDOVAL, W. 2018. PRESAS Y EMBALSES.

WETZEL, R. G. 1981. limnología.

WIKIPEDIA, L. E. L. Embalses [Online].

XV, S. C. 2007. Version 15.2.14.

# ANEXOS

**Anexo 1 Balance hídrico del año 2006**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Unidad Empresarial: SURESTE						Embalse: HANABANILLA			
N.O.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	363,82	363,57	363,30	362,96	362,58	362,21	362,42	361,98	362,03	362,39
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	282,346	277,271	271,750	264,920	257,510	250,295	254,390	245,814	246,785	253,805
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-5,075	-5,521	-6,830	-7,410	-7,215	4,095	-8,576	0,971	7,020	-6,825
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	0,539	0,458	0,425	1,366	2,437	4,285	2,474	2,769	3,295	1,902
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	0,539	0,458	0,425	1,366	2,437	4,285	2,474	2,769	3,295	1,902
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,509	1,877	2,852	3,030	2,821	2,261	2,398	2,297	2,034	1,781
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	8,470	6,808	6,327	7,988	10,084	11,623	15,423	10,272	15,398	16,586
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>	0,001	0,001	0,001	0,001						
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>										
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	9,980	8,686	9,180	11,019	12,905	13,884	17,821	12,569	17,432	18,367
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	4,366	2,707	1,925	2,243	3,253	13,694	6,771	10,771	21,157	9,640
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	1,629	1,119	0,718	0,866	1,214	5,287	2,526	4,019	8,169	3,597

**Anexo 2 Balance hídrico del año 2007**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE											
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Unidad Empresarial: SURESTE					Embalse: HANABANILLA			
N.O.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	361,40	360,84	360,34	359,12	358,20	358,16	360,45	360,66	360,49
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	234,620	223,844	214,294	191,520	174,980	174,264	216,395	220,406	217,159
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-10,776	-9,550	-22,774	-16,540	-0,716	42,131	4,011	-3,247	-3,629
Entradas controladas											
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	0,383	0,814	1,224	0,677	5,268	4,764	2,807	2,268	3,875
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>									
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	0,383	0,814	1,224	0,677	5,268	4,764	2,807	2,268	3,875
Salidas controladas											
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,608	1,690	2,173	2,737	1,946	1,912	2,527	2,173	1,975
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	11,223	10,552	20,975	15,015	16,403	13,922	10,455	8,803	12,968
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	12,835	12,242	23,148	17,752	18,349	15,834	12,982	10,976	14,943
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	1,676	1,878	-0,850	0,535	12,365	53,201	14,186	5,461	7,439
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	0,625	0,776	-0,317	0,206	4,614	20,541	5,293	2,038	2,872

**Anexo 3 Balance hídrico del año 2008**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Unidad Empresarial: SURESTE					Embalse: HANABANILLA				
N.O.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	360,16	359,60	358,84	358,14	357,46	356,69	355,80	354,91	358,85	363,85
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	210,856	200,400	186,436	173,906	161,950	148,878	134,840	122,230	186,615	283,564
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-10,456	-13,964	-12,530	-11,956	-13,072	-14,038	-12,610	64,385	96,949	2,030
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	0,489	0,395	2,468	1,037	1,203	2,171	2,941	6,156	7,076	3,717
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	0,489	0,395	2,468	1,037	1,203	2,171	2,941	6,156	7,076	3,717
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,647	1,723	2,053	2,111	2,353	2,098	2,195	2,160	2,032	1,774
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	11,243	13,968	14,290	12,852	12,438	17,803	16,410	16,707	15,453	16,848
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,902
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	12,890	15,691	16,343	14,963	14,791	19,901	18,605	18,870	17,486	22,523
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	1,945	1,332	1,345	1,970	0,516	3,692	3,054	77,099	107,359	20,838
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	0,726	0,551	0,502	0,760	0,193	1,425	1,140	28,768	41,451	7,775

**Anexo 4 Balance hídrico del año 2009**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Complejo Hidráulico: SUR					Embalse: HANABANILLA				
No.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	355,50	354,66	354,38	353,73	353,32	352,80	352,40	352,31	352,63	353,99
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	130,550	118,980	115,340	107,079	102,036	95,880	91,440	90,441	93,993	110,277
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-11,570	-3,640	-8,261	-5,043	-6,156	-4,440	-0,999	3,552	16,284	14,124
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	0,027	2,178	0,658	0,624	1,983	2,235	2,861	2,203	4,059	2,345
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	0,027	2,178	0,658	0,624	1,983	2,235	2,861	2,203	4,059	2,345
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,387	1,375	1,586	1,648	1,703	1,419	0,819	0,824	0,857	1,097
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	12,490	12,033	11,373	6,934	8,730	10,510	10,593	10,726	9,551	10,151
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,902
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	13,877	13,408	12,959	8,582	10,433	11,929	11,412	11,550	10,408	15,150
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	2,280	7,590	4,040	2,915	2,294	5,254	7,552	12,899	22,633	26,929
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	0,851	3,137	1,507	1,125	0,856	2,029	2,818	4,813	8,739	10,048

**Anexo 5 Balance hídrico del año 2010**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Complejo Hidráulico: SUR					Embalse: HANABANILLA				
No.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	355,50	354,66	354,38	353,73	353,32	352,80	352,40	352,31	352,63	353,99
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	130,550	118,980	115,340	107,079	102,036	95,880	91,440	90,441	93,993	110,277
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-11,570	-3,640	-8,261	-5,043	-6,156	-4,440	-0,999	3,552	16,284	14,124
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	0,027	2,178	0,658	0,624	1,983	2,235	2,861	2,203	4,059	2,345
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	0,027	2,178	0,658	0,624	1,983	2,235	2,861	2,203	4,059	2,345
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,387	1,375	1,586	1,648	1,703	1,419	0,819	0,824	0,857	1,097
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	12,490	12,033	11,373	6,934	8,730	10,510	10,593	10,726	9,551	10,151
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,902
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	13,877	13,408	12,959	8,582	10,433	11,929	11,412	11,550	10,408	15,150
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	2,280	7,590	4,040	2,915	2,294	5,254	7,552	12,899	22,633	26,929
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	0,851	3,137	1,507	1,125	0,856	2,029	2,818	4,813	8,739	10,048

**Anexo 6 Balance hídrico del año 2011**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Complejo Hidráulico: SUR					Embalse: HANABANILLA				
No.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	354,38	354,07	353,69	353,04	352,43	351,87	352,11	352,71	352,57	353,04
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	115,340	111,310	106,587	98,592	91,773	85,674	88,221	94,881	93,327	98,592
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-4,030	-4,723	-7,995	-6,819	-6,099	2,547	6,660	-1,554	5,265	11,316
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	0,659	0,281	0,317	1,025	0,952	3,291	2,577	2,007	2,900	2,857
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	0,659	0,281	0,317	1,025	0,952	3,291	2,577	2,007	2,900	2,857
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,169	1,376	1,583	1,694	1,633	0,923	0,892	1,009	0,804	0,774
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	7,496	6,923	10,101	9,082	8,985	7,956	7,631	7,702	6,470	6,692
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>										
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>										
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	8,665	8,299	11,684	10,776	10,618	8,879	8,523	8,711	7,274	7,466
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	3,976	3,295	3,372	2,932	3,567	8,135	12,606	5,150	9,639	15,925
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	1,483	1,362	1,258	1,132	1,331	3,141	4,704	1,921	3,722	5,942

**Anexo 7 Balance hídrico del año 2012**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Complejo Hidráulico: SUR					Embalse: HANABANILLA				
No.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	361,47	361,13	360,60	360,08	359,70	359,80	359,31	358,66	357,84	358,14
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	235,971	229,409	219,260	209,328	202,250	204,100	195,035	183,214	168,600	173,906
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-6,562	-10,149	-9,932	-7,078	1,850	-9,065	-11,821	-14,614	5,306	14,857
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	0,557	0,278	0,728	2,863	3,499	3,361	2,482	3,595	3,104	4,522
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	0,557	0,278	0,728	2,863	3,499	3,361	2,482	3,595	3,104	4,522
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,393	1,582	1,651	1,348	1,453	1,387	1,287	1,166	1,001	0,804
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	7,042	9,556	9,152	10,655	3,895	16,453	21,439	19,609	4,849	10,348
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>										
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>										
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	8,435	11,138	10,803	12,003	5,348	17,840	22,726	20,775	5,850	11,152
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	1,316	0,711	0,143	2,062	3,699	5,414	8,423	2,566	8,052	21,487
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	0,491	0,294	0,053	0,796	1,380	2,090	3,143	0,958	3,109	8,018

**Anexo 8 Balance hídrico del año 2013**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Complejo Hidráulico: SUR					Embalse: HANABANILLA				
No.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	361,47	361,13	360,60	360,08	359,70	359,80	359,31	358,66	357,84	358,14
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	235,971	229,409	219,260	209,328	202,250	204,100	195,035	183,214	168,600	173,906
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-6,562	-10,149	-9,932	-7,078	1,850	-9,065	-11,821	-14,614	5,306	14,857
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	0,557	0,278	0,728	2,863	3,499	3,361	2,482	3,595	3,104	4,522
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	0,557	0,278	0,728	2,863	3,499	3,361	2,482	3,595	3,104	4,522
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,393	1,582	1,651	1,348	1,453	1,387	1,287	1,166	1,001	0,804
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	7,042	9,556	9,152	10,655	3,895	16,453	21,439	19,609	4,849	10,348
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>										
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>										
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	8,435	11,138	10,803	12,003	5,348	17,840	22,726	20,775	5,850	11,152
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	1,316	0,711	0,143	2,062	3,699	5,414	8,423	2,566	8,052	21,487
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	0,491	0,294	0,053	0,796	1,380	2,090	3,143	0,958	3,109	8,018

**Anexo 9 Balance hídrico de año 2014**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Complejo Hidráulico: SUR					Embalse: HANABANILLA				
No.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	359,04	358,88	358,08	357,45	356,97	357,03	356,99	356,82	356,95	356,51
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	190,040	187,152	172,832	161,775	153,414	154,425	153,738	150,984	153,090	145,962
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-2,888	-14,320	-11,057	-8,361	1,011	-0,687	-2,754	2,106	-7,128	11,263
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	1,360	1,251	1,441	1,032	4,163	2,897	3,181	2,680	2,015	4,653
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	1,360	1,251	1,441	1,032	4,163	2,897	3,181	2,680	2,015	4,653
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,058	1,167	1,469	1,594	2,405	2,245	2,536	1,240	0,955	0,879
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	8,867	16,113	13,917	8,646	12,213	13,173	17,417	11,124	11,620	7,189
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>										
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>										
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	9,925	17,280	15,386	10,240	14,618	15,418	19,953	12,364	12,575	8,068
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	5,677	1,709	2,888	0,847	11,466	11,834	14,018	11,790	3,432	14,678
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	2,118	0,706	1,078	0,327	4,278	4,569	5,230	4,399	1,325	5,477

**Anexo 10 Balance hídrico del año 2015**

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Unidad Empresarial: SURESTE					Embalse: HANABANILLA				
No.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	356,21	355,19	354,64	353,77	352,85	352,50	352,25	351,82	352,43	353,13
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	141,10	126,12	118,72	107,57	96,44	92,55	89,78	85,16	91,77	99,70
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-14,985	-7,397	-11,149	-11,136	-3,885	-2,775	-4,611	6,609	7,926	8,979
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	0,130	0,320	0,065	0,437	1,752	2,088	1,161	3,031	2,432	2,649
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	0,130	0,320	0,065	0,437	1,752	2,088	1,161	3,031	2,432	2,649
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	1,100	1,264	1,395	2,045	1,130	1,099	1,208	0,986	0,771	0,784
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	15,402	8,008	11,106	11,959	6,229	9,121	4,961	2,891	4,296	4,927
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000					
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000					
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	16,502	9,272	12,501	14,004	7,359	10,220	6,169	3,877	5,067	5,711
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	1,387	1,555	1,287	2,431	1,722	5,357	0,397	7,455	10,561	12,041
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	0,518	0,643	0,480	0,939	0,642	2,068	0,148	2,782	4,077	4,493

Anexo 1 Balance hídrico del año 2016

RESUMEN DE DATOS MENSUALES DEL BALANCE HIDRICO DE EMBALSE												
PROVINCIA DE VILLA CLARA			Unidad Empresarial: SURESTE					Embalse: HANABANILLA				
No.	COMPORTAMIENTO DEL VASO	um	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
1	Nivel del agua el día 1ro.	m	354,14	353,85	353,48	353,05	352,45	352,06	352,02	352,24	352,73	353,14
2	Volumen del agua el día 1ro.	hm <sup>3</sup>	112,220	108,555	104,004	98,715	91,995	87,666	87,222	89,664	95,103	99,822
DW	Variación del volumen	hm <sup>3</sup>	-3,665	-4,551	-5,289	-6,720	-4,329	-0,444	2,442	5,439	4,719	3,936
Entradas controladas												
3	Volumen de lluvia sobre el espejo	hm <sup>3</sup>	1,017	0,141	0,392	0,283	2,279	1,674	1,937	3,086	1,908	1,999
4	Volumen del escurrimiento	hm <sup>3</sup>										
E	Total de entradas controladas	hm <sup>3</sup>	1,017	0,141	0,392	0,283	2,279	1,674	1,937	3,086	1,908	1,999
Salidas controladas												
5	Volumen de evaporación	hm <sup>3</sup>	0,886	0,960	1,317	1,375	1,344	0,852	0,774	0,789	0,867	0,636
6	Volumen de extracción	hm <sup>3</sup>	7,356	6,204	5,279	5,863	5,692	5,175	5,466	6,664	8,286	9,074
7	Volumen de filtración	hm <sup>3</sup>										
8	Volumen de vertimientos	hm <sup>3</sup>										
S	Total de salidas controladas	hm <sup>3</sup>	8,242	7,164	6,596	7,238	7,036	6,027	6,240	7,453	9,153	9,710
	Var. De volumen (DW) más entradas (E) menos salidas(S)	hm <sup>3</sup>	3,560	2,472	0,915	0,235	0,428	3,909	6,745	9,806	11,964	11,647
Qmed	Gasto medio diario	m <sup>3</sup> /s	1,328	1,022	0,341	0,091	0,160	1,509	2,517	3,659	4,619	4,346

Anexo 12 Niveles de embalse Hanabanilla a partir del año 1975 hasta el 2016

