

UCUENCA

**Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TOMBAMBA BASADO
EN UN ANÁLISIS JERÁRQUICO PARA IDENTIFICAR LOS PESOS DE LOS
PARÁMETROS DE UN ÍNDICE PROPIO DE CALIDAD DEL AGUA**

**Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Ambiental**

Autor:

Luis Alfonso Flores Rengifo
CI: 0152143202
floresfr28@gmail.com

Director:

Ing. Fausto Fernando García Ávila, Ph. D
CI: 0301454617

Cuenca – Ecuador

13 de agosto de 2022

Resumen:

En la presente investigación se evaluó la calidad del agua del río Tomebamba aplicando cuatro índices ya establecidos en otras partes del mundo y mediante la creación de un índice propio basado en un proceso de jerarquía analítica para la asignación de pesos de los parámetros utilizados en este índice propio. El área de estudio corresponde al río Tomebamba partiendo desde su yacimiento en el sector conocido como tres cruces del Parque Nacional Cajas hasta su intersección con el río Cuenca. Para la realización del presente estudio se utilizó los datos de la calidad de agua registrados por ETAPA EP en los diferentes puntos de monitoreo ubicado en la subcuenca del río. Se analizó la información de los datos de las estaciones de monitoreo, llegando a determinar 10 estaciones para el análisis, esto en vista que cubren toda la trayectoria del río, se analizó la calidad del agua en un periodo de 8 años desde el 2012 hasta el 2019, para lo cual se aplicaron 4 índices de calidad del agua el NSF, Dinius, Oregon y el índice CCME. La creación del propio índice partió de la identificación de los parámetros más importantes mediante un análisis de correlación, posteriormente se aplicó el proceso de jerarquía analítica (AHP) para la identificación de los pesos de los parámetros seleccionados. De acuerdo a los resultados de la calidad del agua del río, tanto el índice NSF, Dinius y Oregon presentaron resultados idénticos de la calidad del agua; en las estaciones de la parte alta la calidad del agua es mucho mejor que en las partes bajas, no obstante, el índice NSF y de Oregon clasificaron la calidad del agua de manera general, mientras que el índice de Dinius categorizó la calidad del agua de acuerdo al criterio general y al criterio de consumo humano. Por otra parte, el índice CCME determinó la calidad del agua para cada estación de monitoreo categorizándola como buena en la parte alta regular en la parte media y pobre en la parte baja. Con el AHP se cuantificó los pesos de los parámetros más importantes de manera estadística, siendo los coliformes fecales el parámetro al que mayor peso asignaron los encuestados seguido del color y la DBO₅, de acuerdo al índice propio los resultados de la calidad del agua fueron muy similares a los resultados de los índices antes mencionados. Para corroborar los resultados del índice propio se aplicó un análisis de correlación con los resultados del NSF y el índice de Dinius, mostrando resultados de correlación muy buenos por encima de 0.5 en la mayoría de las estaciones seleccionadas, llegando a la conclusión que la calidad del agua disminuye conforme la concentración de los parámetros de calidad agua aumentan. Aplicando la regresión lineal múltiple se determinó la ecuación que mejor se ajusta a los datos para el cálculo del ICA en otras fechas y estaciones del río Tomebamba. Estos resultados servirán para que la empresa ETAPA EP planifique, gestione y realice actividades en beneficio del recurso hídrico, así mismo, el índice propio puede ser aplicado en los otros ríos de Cuenca.

Palabras clave: Calidad del agua. Índice NSF. Índice de Dinius. Índice de Oregon. Índice CCME. Proceso de jerarquía analítica (AHP). Estaciones de monitoreo. Análisis de correlación. Asignación de pesos.

Abstract:

In this research, the water quality of the Tomebamba River was evaluated by applying four indexes already established in other parts of the world and by creating our own index based on an analytical hierarchy process for assigning weights to the parameters used in this index. The study area corresponds to the Tomebamba River, starting from its source in the sector known as tres cruces in the Cajas National Park to its intersection with the Cuenca River. The water quality data recorded by ETAPA EP at the different monitoring points located in the river sub-basin were used for this study. The information from the data of the monitoring stations was analyzed, determining 10 stations for the analysis, this in view that they cover the entire trajectory of the river, the water quality was analyzed in a period of 8 years from 2012 to 2019, for which 4 water quality indexes were applied the NSF, Dinius, Oregon and the CCME index. The creation of the index itself started from the identification of the most important parameters through a correlation analysis, subsequently the analytical hierarchy process (AHP) was applied for the identification of the weights of the selected parameters. According to the results of the river water quality, both the NSF, Dinius and Oregon index presented identical results of water quality; in the stations of the upper part the water quality is much better than in the lower parts, however, the NSF and Oregon index classified the water quality in a general way, while the Dinius index categorized the water quality according to the general criterion and the criterion of human consumption. On the other hand, the CCME index determined the water quality for each monitoring station by categorizing it as good in the high part, regular in the medium part, and poor in the low part. With the AHP, the weights of the most important parameters were quantified statistically, with fecal coliforms being the parameter to which the respondents assigned the greatest weight, followed by color and BOD5; according to the index itself, the water quality results were very similar to the results of the aforementioned indexes. To corroborate the results of the own index, a correlation analysis was applied with the results of the NSF and the Dinius index, showing very good correlation results above 0.5 in most of the selected stations, reaching the conclusion that water quality decreases as the concentration of water quality parameters increases. Applying multiple linear regression, the equation that best fits the data for calculating the AQI on other dates and stations of the Tomebamba River was determined. These results will be useful for ETAPA EP to plan, manage and carry out activities for the benefit of the water resource; likewise, the index itself can be applied to other rivers in Cuenca.

Keywords: Water quality. NSF index. Dinius index. Oregon index. CCME index. Analytical hierarchy process (AHP). Monitoring stations. Correlation analysis. Assignment of weights.

Tabla de Contenido

1	CAPÍTULO I.....	13
1.1	Introducción	13
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo General	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	16
2.1	Calidad del agua	16
2.1.1	Contaminación del agua	16
2.1.2	Parámetros físicos, químicos y biológicos para determinar la calidad del agua ..	17
2.2	Índices de la calidad del agua	19
2.2.1	Ventajas y desventajas del ICA	20
2.2.2	Índice NSF.....	21
2.2.3	Índice Dinius (1978), versión modificada del índice NSF	22
2.2.4	Índice de Oregon (1980).....	22
2.2.5	CCME (2001), versión reformada del índice BCWQI.....	23
2.3	Elaboración de índices de calidad del agua	24
2.4	Proceso de jerarquía analítica	25
2.4.1	Ventajas e inconvenientes del proceso de jerarquía analítica (AHP)	26
2.4.2	Proceso de jerarquía analítica en índices de calidad del agua	26
2.5	Análisis de correlación	29
2.5.1	Correlación de Pearson	30
2.5.2	Correlación de Spearman.....	30
2.6	Legislación aplicable vigente	31
2.6.1	Constitución de la república del Ecuador.....	31
2.6.2	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA) ..	31
2.6.3	Criterios para la calidad del agua.....	31
3	CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1	Delimitación del área de estudio.....	33

3.1.1	Ubicación del área de estudio	33
3.1.2	Descripción del área de estudio	35
3.1.3	Clima.....	35
3.1.4	Vegetación y bosques	35
3.2	Base de datos.....	36
3.2.1	Evaluación de la base de datos.....	36
3.2.2	Selección de estaciones de monitoreo.....	38
3.2.3	Justificación para la selección de estaciones de monitoreo	39
3.2.4	Selección de parámetros para estimar la calidad del agua con índices ya establecidos	39
3.2.5	Justificación para la selección de parámetros	39
3.3	Determinación de la calidad del agua mediante los índices de calidad del agua (ICA _s) ya existentes	40
3.3.1	Metodología para determinar la calidad del agua mediante el Índice NSF	40
3.3.2	Metodología para determinar la calidad del agua mediante el Índice de Dinius .41	
3.3.3	Metodología para determinar la calidad del agua mediante el índice de Oregón 43	
3.3.4	Metodología para determinar la calidad del agua mediante el Índice Canadiense (CCME) 45	
3.4	Identificación de los parámetros para la creación del propio índice del río Tomebamba 46	
3.4.1	Comprobación de la normalidad de los datos	46
3.4.2	Análisis de correlación	46
3.5	Desarrollo del índice propio basado en un proceso de jerarquía analítica.....	47
3.5.1	Identificación de los pesos para cada parámetro seleccionado.....	47
3.5.2	Generación de subíndices	51
3.5.3	Agregación de los subíndices para la obtención del ICA	52
3.5.4	Interpretación del valor del índice	52
3.6	Comparación del índice propio.....	52
3.6.1	Comparación conceptual del índice propio.....	53
3.6.2	Análisis de correlación del índice propio con el NSF y el índice de Dinius.....	53

3.7	Análisis para la calibración del índice propio	53
3.7.1	Análisis de regresión lineal múltiple.....	53
4	CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1	Calidad del agua del río Tomebamba mediante índices de calidad del agua (ICA _s) ya existentes.....	54
4.1.1	Análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos utilizados para el cálculo de los ICA _s	54
4.1.2	Calidad del agua del río Tomebamba mediante el índice NSF	58
4.1.3	Calidad del agua mediante el índice de Dinius	62
4.1.4	Calidad del agua mediante el índice de Oregon	67
4.1.5	Calidad del agua mediante el índice CCME	71
4.2	Identificación de los parámetros para la creación del propio índice del río Tomebamba 72	
4.2.1	Resultados de la prueba de normalidad.....	72
4.2.2	Análisis de correlación	73
4.3	Resultados del índice propio basado en un proceso de jerarquía analítica	74
4.3.1	Resultados de la estructuración de una jerarquía	74
4.3.1	Resultados de las matrices de comparación por pares de los encuestados	74
4.3.1	Resultados de la obtención de los pesos	76
4.4	Calidad del agua de río Tomebamba aplicando el índice propio.....	78
4.5	Análisis de correlación del índice propio con el NSF y el índice de Dinius.....	81
4.6	Análisis de regresión lineal múltiple.....	82
5	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
5.1	Conclusiones	86
5.2	Recomendaciones	87
6	BIBLIOGRAFÍA.....	89

Índice de Tablas

Tabla 1: Ventajas y desventajas del índice de calidad del agua (ICA).....	20
Tabla 2: Ventajas e inconvenientes del AHP.....	26
Tabla 3: Escala fundamental de puntuación	29
Tabla 4: Áreas de Bosques y Vegetación Protectora constituyentes en la subcuenca del río Tomebamba.....	36
Tabla 5: Ubicación de las 25 estaciones de monitoreo de la calidad del agua a lo largo de la subcuenca del río Tomebamba	37
Tabla 6: Estaciones nuevas.....	38
Tabla 7: Ponderación asignado a cada parámetro.....	40
Tabla 8: Clasificación según el ICA NSF.....	41
Tabla 9: Clasificación de la calidad del agua según el ICA para el índice de Dinius	42
Tabla 10: Funciones de subíndices y ponderaciones de cada parámetro para el índice de Dinius	43
Tabla 11: Ecuaciones de subíndices de cada parámetro para el cálculo del ICA de Oregon	44
Tabla 12: Interpretación del WQI.....	45
Tabla 13: Fórmulas para el cálculo de agregación del índice CCME	45
Tabla 14: Interpretación del WQI.....	46
Tabla 15: Escala de 1 a 9 puntos utilizada para el AHP	48
Tabla 16: Valores de índice de consistencia aleatorio (R.I.).....	51
Tabla 17: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte alta	55
Tabla 18: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte media	56
Tabla 19: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte baja	57
Tabla 20: Resultados del ICA – NSF para las estaciones de la parte alta	59
Tabla 21: Resultados del ICA – NSF para las estaciones de la parte media	60
Tabla 22: Resultados del ICA – NSF para las estaciones de la parte baja	61
Tabla 23: Resultados de la calidad del agua – índice de Dinius para las estaciones de la parte alta	64
Tabla 24: Resultados de la calidad del agua – índice de Dinius para las estaciones de la parte media.....	65
Tabla 25: Resultados de la calidad del agua – índice de Dinius para las estaciones de la parte baja	66
Tabla 26: Resultados del ICA - índice de Oregon en las estaciones de la parte alta	68

Tabla 27: Resultados del ICA - índice de Oregon en las estaciones de la parte media	69
Tabla 28: Resultados del ICA - índice de Oregon en las estaciones de la parte baja	70
Tabla 29: Resultados del índice de calidad del agua aplicando el índice CCME para todas las estaciones de monitoreo	71
Tabla 30: Prueba de normalidad de los parámetros para la selección de parámetros para el propio índice.....	73
Tabla 32: Número de encuestados que se tomó en cuenta	74
Tabla 31: Resultados del análisis de correlación para la selección de parámetros	75
Tabla 33: resultados de los pesos para cada parámetro seleccionado	76
Tabla 34: Resultados de los pesos individuales de los 10 encuestados que presentaron relación de coherencia menor a 0.10.....	77
Tabla 35: Resultados de la calidad del agua del río Tomebamba con el índice propio para las estaciones de la parte alta	79
Tabla 36: Resultados de la calidad del agua del río Tomebamba con el índice propio para las estaciones de la parte media	80
Tabla 37: Resultados de la calidad del agua del río Tomebamba con el índice propio para las estaciones de la parte baja	80
Tabla 38: Resultados del análisis de correlación entre el índice propio, el índice NSF y el índice de Dinius	82
Tabla 39: Coeficientes de correlación de los parámetros respecto al ICA propio	83
Tabla 40: Resumen del modelo de regresión lineal múltiple	83
Tabla 41: Análisis ANOVA para el modelo de regresión lineal	84
Tabla 42: Resultados de los coeficientes para ecuación de acuerdo con modelo	84
Tabla 43: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte alta	97
Tabla 44: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte alta	98
Tabla 45: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte media	99
Tabla 46: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte media	100
Tabla 47: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte baja	101
Tabla 48: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte baja	102
Tabla 49: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte baja	103

Tabla 50: Pesos de los parámetros de acuerdo a cada matriz de comparación por pares117

Índice de Figuras

Figura 1: Pasos para la elaboración de un índice de calidad del agua.....	24
Figura 2:Diagrama de flujo de los pasos de AHP en la ponderación de parámetros para el ICA	28
Figura 3: Ubicación del área de estudio (Río Tomebamba) a nivel de territorio nacional	33
Figura 4: Ubicación del área de estudio (Río Tomebamba) a nivel de territorio provincial - Azuay	34
Figura 5: Ubicación del área de estudio (Río Tomebamba) a nivel de territorio cantonal - Cuenca	34
Figura 6: Ubicación de las estaciones de monitoreo seleccionadas	38
Figura 7: Esquema de una matriz de comparación por pares para el AHP	48
Figura 8: Matriz de comparación por pares	49
Figura 9: Calidad del agua del río Tomebamba según el índice NSF	62
Figura 10: Calidad del agua del río Tomebamba según el índice de Dinius	67
Figura 11: Calidad del agua del río Tomebamba según el índice de Oregon	70
Figura 12: Calidad del agua del río Tomebamba aplicando el índice CCME	72
Figura 13: Jerarquía estructurada para la determinación de los pesos del AHP	74
Figura 14: Box-plot de los pesos de cada parámetro seleccionado	78
Figura 15: Calidad del agua del río Tomebamba según el índice propio - AHP	81

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Luis Alfonso Flores Rengifo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TOMBAMBA BASADO EN UN ANÁLISIS JERÁRQUICO PARA IDENTIFICAR LOS PESOS DE LOS PARÁMETROS DE UN ÍNDICE PROPIO DE CALIDAD DEL AGUA", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 13 de agosto de 2022



Luis Alfonso Flores Rengifo

C.I: 0152143202

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Luis Alfonso Flores Rengifo autor del trabajo de titulación "EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TOMEBAMBA BASADO EN UN ANÁLISIS JERÁRQUICO PARA IDENTIFICAR LOS PESOS DE LOS PARÁMETROS DE UN ÍNDICE PROPIO DE CALIDAD DEL AGUA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 13 de agosto de 2022



Luis Alfonso Flores Rengifo

C.I: 0152143202

DEDICATORIA

Con gran esfuerzo y sacrificio dedico este trabajo de investigación a mi padre celestial Dios, que me ha dado la fuerza suficiente para culminar esta etapa y ha puesto en mi camino personas de buen corazón que me aportan positivamente.

Quiero dedicar también a mis padres Karina Rengifo y Cirilo Flores, hermanos y abuelos ya que fueron y serán mi más grande motivo e inspiración para lograr este gran sueño que me ayuda a seguir formándome académicamente, todo este esfuerzo y este logro se lo debo a ustedes por el amor, cariño y confianza que han puesto en mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la sabiduría que me ha dado para seguir cada día y no darme por vencido.

A mis padres Cirilo y Karina, a mis hermanos Cinthia, Antony, Yojani, Manuel y Rosita, que día a día me apoyaban con sus consejos. Así también, agradezco a la señora Alicia y Armando por apoyarme en el momento que más lo necesite, a mis amigos Marilyn, Paula, Pedro y Doménica por ayudarme compartiendo sus conocimientos.

Al ingeniero Fernando García, por haberme ayudado en todo este trayecto, compartiéndome sus conocimientos, por la paciencia que supo tener y el compromiso que pone en cada meta propuesta. Con ellos y todos los que me han ayudado quedo eternamente agradecido.

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

Los cuerpos de agua superficial son un pilar fundamental para el desarrollo de la sociedad puesto que permiten el abastecimiento para la ejecución de actividades socioeconómicas llevadas a cabo en todas las ciudades y asentamientos poblacionales; sin embargo, estas actividades son las responsables de la alteración y deterioro de la calidad de las mismas, no obstante, a esto se suman los factores naturales como: arrastre de material particulado, presencia de materia orgánica, etc. (Torres et al., 2009). En tal sentido, en ámbitos medioambientales realizar un análisis de la calidad del agua de las fuentes hídricas es sumamente importante para contribuir con el desarrollo sostenible, esto implica el monitoreo y análisis de los diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua.

Para el análisis de los parámetros, surgen grandes retos en la búsqueda de herramientas que puedan determinar el estado de una masa de agua, sin embargo, uno de los enfoques más comunes y utilizados es el uso de índices de calidad del agua (ICA) el cual agrega y transforma los parámetros de calidad del agua en valores adimensionales de modo que el estado del agua pueda definirse de manera sencilla (Sutadian et al., 2017). Los ICA solo determinan la calidad del agua de manera general y más no de acuerdo a un uso en específico, así mismo los resultados pueden utilizarse para informar a los responsables y al público de forma sencilla y comprensible.

A nivel local se ha determinado la calidad del agua de los ríos aplicando los índices de calidad del agua como herramienta de análisis, pese a esto, se debe enfocar en crear índices propios para los ríos de la región ya que existen metodologías que pueden ser aplicadas con facilidad, muchas de estas metodologías están basadas en la opinión de expertos conocedores del tema, lo cual hace que los índices de calidad del agua sean creados de manera subjetiva, por lo cual optar por una metodología que no tome en cuenta la subjetividad sería un gran avance para la creación de un propio índice.

En la ciudad de Cuenca existen cuatro ríos (Tarqui, Yanuncay, Machángara y Tomebamba), mismos que contribuyen al desarrollo de la ciudad, dichos cuerpos hídricos son afluentes importantes del río Paute, en cuya cuenca de captación opera el proyecto nacional hidroeléctrico Paute. El trabajo de investigación tiene como área de estudio el río Tomebamba el cual tiene sus orígenes en el Parque Nacional Cajas, para ser exactos en el sector conocido como Tres Cruces, atraviesa la parroquia de Sayausí y bordea el centro histórico de Cuenca. El río es fuente de abastecimiento para la planta de tratamiento de agua potable “El Cebollar” con un caudal entre 800 a 1000 l/s (Pauta et al., 2019).

La calidad del agua del río Tomebamba se ve afectado por diferentes factores, tales como: el crecimiento rápido de múltiples actividades agropecuarias, teniendo como principal la producción hortícola misma que se caracteriza por la presencia de pequeños cultivos, la crianza de animales menores (ganadería), además la actividad artesanal (ladrilleras) y la creación de centros turísticos (al realizar cambios en el uso del suelo) afecta directamente a la calidad del agua del río, dichas actividades se presentan en la parte baja (Segarra, 2016). Adicional a estos factores se suma la contaminación por disposición final, por dilución de alcantarillados que se encuentran en las cabeceras parroquiales, caseríos y población dispersa en general, por otra parte, están los vertidos ilegales mismos que no están conectados al sistema de colectores marginales de la depuración de aguas. Este tipo de contaminación trae consecuencias como la limitación del uso del recurso, tanto para fines agrícolas, industriales y para abastecimiento de agua a la población (Cocha, 2009).

Con base a lo mencionado y en vista que la calidad del agua del río Tomebamba se influenciada por estos factores y siendo fuente de abastecimiento para la planta de tratamiento de agua potable El Cebollar, es importante evaluar y detallar la calidad de dicho recurso hídrico, mismo que se puede realizar aplicando los índices de calidad de agua (ICA) como herramienta de análisis. Cabe recalcar que existen diferentes ICA propuestos por otros autores, sin embargo, dichos índices fueron creados en otras partes del mundo y aplicados para ríos específicos con calidad y condiciones diferentes.

Por lo antes mencionado es de importancia determinar un índice propio para conocer la calidad del agua del río Tomebamba. Además, generar un índice propio para el río presenta una gran ventaja ya que este puede ser aplicado para los otros ríos de la ciudad, debido a sus características similares; sin dejar a lado que ayudará a la toma de decisiones futuras, tanto para el bienestar ambiental, social y económico.

En esta investigación se determina la calidad del agua del río Tomebamba durante 8 años (2012 – 2019) utilizando los datos de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos monitoreados por la empresa ETAPA EP, la calidad del agua se determina aplicando índices ya establecidos en otras partes mundo, sin embargo y en vista a la necesidad de tener información actual y detallada de la calidad del agua del río, se crea un propio índice basado en un proceso de jerarquía analítica para identificar los pesos de los parámetros más importantes. Con esto se está precautelando que las condiciones del río Tomebamba sean las adecuadas para consumo humano y por ende cautelar la salud de la ciudadanía, así mismo se garantiza un hábitat adecuado para las diferentes especies que forman parte de la biodiversidad.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la calidad del agua del río Tomebamba basado en un proceso de jerarquía analítica para identificar los pesos de los parámetros de un índice propio de calidad del agua.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la calidad del agua del río Tomebamba aplicando varios índices de calidad del agua establecidos en otras partes del mundo.
- Identificar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos más importantes para la creación del propio índice basado en un proceso de jerarquía analítica.
- Desarrollar un índice propio basado en un proceso de jerarquía analítica para evaluar la calidad de agua del río Tomebamba.
- Calibración y comparación del índice propio para evaluar la calidad del río Tomebamba.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Calidad del agua

La calidad del agua indica el grado de aceptabilidad que esta tendrá para los diferentes usos tales como: consumo humano, recreación, riego, entre otros. Esta calidad va a depender de la composición del agua influenciada por los procesos antropogénicos y naturales, en los diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos, por lo que se dice que el agua no es de buena calidad si los valores exceden los límites máximos permisibles de acuerdo a las normativas nacionales e internacionales (Sierra, 2011). Uno de los desafíos para los responsables de la formulación de políticas y los profesionales del agua, el saneamiento y la higiene es garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua de buena calidad, la misma que se establece en el objetivo 6 de desarrollo sostenible (ODS) (Agua limpia y saneamiento) (Akter et al., 2016).

2.1.1 Contaminación del agua

El deterioro de la calidad del agua está ligado con factores naturales que afectan en menor concentración; así como factores antropogénicos que tienen mayor impacto, tales como el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales, de producción agrícola y ganadera. Por otra parte, están las acciones relacionadas con el transporte terrestre, fluvial y marítimo de sustancias peligrosas y tóxicas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), define a un cuerpo hídrico contaminado cuando la composición natural del agua ha sido alterada ya sea por cualquiera de los factores mencionados anteriormente y ésta sufra cambios en sus propiedades físico-químicas o biológicas, es decir, pierde su utilidad para los diferentes fines que estaba destinada (Pauta & Chang, 2014).

2.1.1.1 Contaminación del agua por fuentes difusas

También llamada contaminación por fuentes no fijas, se originan cuando existe un sinnúmero de grandes y pequeñas fuentes de descargas cuyas ubicaciones y aportes no han sido localizadas, la gran mayoría de contribución de este tipo de contaminación se da a través de derrames o filtración por los poros de los suelos, por lo general está altamente relacionado con las actividades agrícolas (Gonzalez, 2007). Sin embargo, evaluar los potenciales impactos generados por dichas actividades aún es un reto para los investigadores, esto debido a la alta generación de sólidos producto de la quema de pastizales, bosques, drenaje agrícola, escorrentías de campos agrícolas o de pastoreo. Además de las escorrentías pluviales, fugas de combustible y en la red de alcantarillado (Galaviz & Sosa, 2019).

2.1.1.2 Contaminación del agua por fuentes puntuales

Se denomina contaminación por fuentes puntuales cuando se conoce el origen y los responsables del vertimiento de agua contaminadas, estas pueden ser tanto de origen municipal como industrial, cabe señalar que dentro de estas no se consideran las descargas agrícolas, escorrentía superficial, agua de lluvia, ni el caudal de retorno de la agricultura de regadío (Galaviz & Sosa, 2019). Es decir, en su mayoría estas son producto de las actividades antropogénicas, debido a que su transporte se da por tuberías, contenedores, pozos, canales, etc.

2.1.2 Parámetros físicos, químicos y biológicos para determinar la calidad del agua

2.1.2.1 Parámetros físicos

Estos parámetros de control se caracterizan principalmente porque no cambian las características del agua durante su etapa de determinación (Forero et al., 2013; Sierra, 2011; Sosa, 2016).

- **Color:** este principalmente se ve afectado por la presencia de hierro, manganeso, compuestos metálicos, descomposición de la materia orgánica, etc.
- **Sólidos totales:** dentro de este se encuentran los sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (SD) y sólidos sedimentables (SSD), mismos que indican la presencia de sales disueltas y partículas en suspensión, cabe recalcar que los sólidos tienen una relación directa con parámetros como color, turbiedad y la concentración de oxígeno.
- **Sólidos Disueltos totales (SDT):** los sólidos disueltos totales es una medida en forma molecular, ionizada o micro-granular de las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua; en gran parte la concentración de SDT se debe a la presencia de minerales, gases generados a partir de la degradación de la materia orgánica compuestos químicos y metales (Machado & Toasa, 2012).
- **Conductividad:** la conductividad es un parámetro indicativo de la presencia de sales disueltas en el agua, por lo que mide la cantidad de iones de bicarbonato, cloruros, sulfatos, Ca, Mg, entre otros. Así mismo sirve como medida indirecta de los sólidos disueltos. En base a lo mencionado, si el agua presenta una alta conductividad hace referencia a un agua altamente corrosiva.
- **Temperatura:** en términos físicos es el estado térmico de un cuerpo o sustancia, este parámetro es fundamental en el agua ya que de ella dependen todas las actividades metabólicas.

- Turbidez: es una medida que indica el grado en el cual el agua pierde su transparencia principalmente por la presencia de sólidos (sólidos en suspensión).
- pH: expresa el grado de intensidad de las condiciones del agua ya sean ácidas o básicas en base a la presencia de iones de hidrógeno, es un factor muy importante, porque determinados procesos químicos solamente pueden tener lugar a un determinado pH.

2.1.2.2 Parámetros químicos

Estos parámetros son todo lo contrario a los físicos, ya que estos, si cambian las características del agua para su determinación (Forero et al., 2013; Gualdrón, 2016; Sierra, 2011; Sosa, 2016).

- Dureza: esta tiene una relación directa con el jabón ya que de este dependerá la capacidad de generar espuma en grandes cantidades, se debe a la presencia de calcio y magnesio principalmente.
- Alcalinidad: se define como la capacidad que tiene el agua para regular o neutralizar los cambios de acidez en la misma, muy a menudo este parámetro se encuentra relacionado con el potencial de hidrógeno (pH) por lo que suelen ser determinados de manera conjunta (Sigler & Bauder, 2017).
- Cloruros: en términos químicos los cloruros son sales producto de la combinación de gas cloro con un metal, este es fundamental para la vida ya que pequeñas cantidades de cloruros son requeridas para la función celular de los seres vivos. En el agua el cloruro está presente en forma de ion Cl^- es uno de los aniones inorgánicos importantes ya que este puede tener como fuentes: aguas residuales, vertidos industriales e incluso de origen natural (García et al., 2009).
- Oxígeno disuelto (OD): este parámetro da un indicativo de la contaminación del agua y del soporte que está puede dar para el crecimiento y reproducción animal y vegetal. En otras palabras, indica la cantidad de oxígeno disuelto disponible en los cuerpos de agua.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5): la DBO mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida. Es la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión.
- Demanda química de oxígeno (DQO): es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida.

- Nitratos (NO_3): compuesto inorgánico que no es peligroso para la salud a menos que sea reducido a nitrito (NO_2). El nitrato es uno de los más frecuentes contaminantes de aguas subterráneas.
- Fosfatos: este abarca distintos compuestos (ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico) se encuentran principalmente en aguas superficiales en forma natural (rocas, restos de animales) y en forma artificial (fertilizantes y detergentes, aguas residuales, restos de mataderos de animales).

2.1.2.3 Parámetros biológicos

Estos por lo general son procedentes de las aguas residuales y de las plantas de tratamiento de aguas, son claves para decir que existe una contaminación del recurso hídrico (Gualdrón, 2016).

- Coliformes fecales: los coliformes fecales son utilizados como indicadores claves para determinar la calidad del agua potable e importantes para su valoración en términos sanitarios, dentro de este grupo se encuentran las enterobacterias, así mismo, están las bacterias aerobias y anaerobias siendo representativa la *E. Coli* la cual se caracteriza por su rápido crecimiento en condiciones de temperatura elevadas (Fernández, 2017; Gualdrón, 2016).
- Coliformes totales: en los coliformes totales se encuentran todas las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, las cuales se utilizan para identificar los cambios que se producen en un cuerpo de agua local (Carrillo & Lozano, 2008).

2.2 Índices de la calidad del agua

En las últimas décadas la calidad del agua se ha convertido en una de las preocupaciones a nivel global, esto debido a su alta importancia como recurso precursor de la vida. En tal sentido una de las herramientas aplicadas para determinar la calidad del agua es la aplicación de índices de calidad de agua (Pesántez & Roldán, 2021). Desde 1960, varios índices de calidad del agua (ICA) se han desarrollado para evaluar el estado de ecosistemas acuáticos de diferentes fuentes utilizando un grupo de parámetros seleccionados (Singh & Saxena, 2018). Estos índices permiten reducir la larga lista de parámetros a un solo número compuesto, normalmente adimensional, en una secuencia reproducible simplista (Sutadian et al., 2018; Tomas et al., 2017). El uso de estos índices que agrupan varios parámetros de calidad de agua puede resultar una buena forma de medir la degradación de los recursos hídricos y los ecosistemas (Abtahi et al., 2015; Jahan & Strezov, 2017).

El ICA se ha aplicado ampliamente en el monitoreo de la calidad del agua tanto para aguas subterráneas como superficiales, específicamente en ríos, desempeñando un papel importante en

la gestión de recursos hídricos (Solangi et al., 2018). El ICA se puede desarrollar sobre el perfil longitudinal de un río, utilizando los resultados de calidad del agua obtenidos de los mejores modelos de calidad de agua para indicar las tendencias espaciales de la calidad del agua a lo largo de un régimen fluvial (Iqbal et al., 2018; Şener et al., 2017). En comparación con los reportes de calidad del agua convencionales, los métodos basados en ICA son una herramienta eficiente de comunicación y facilitan la comprensión del estado general de la masa de agua y el ecosistema basándose en un valor único (índice) en lugar de la lista de valores paramétricos (Iqbal et al., 2018).

2.2.1 Ventajas y desventajas del ICA

Debido a la gran variedad de parámetros y factores que repercuten sobre la calidad del agua hace que su análisis sea un tanto compleja, por lo que los ICAs hacen que dicho análisis se simplifique con el fin obtener resultados concisos y de fácil interpretación para la toma de decisiones, sin embargo, los índices no son exentos de debilidades (Pérez et al., 2018). En la *tabla 1* se resumen las diferentes ventajas y desventajas del índice de calidad del agua.

Tabla 1: Ventajas y desventajas del índice de calidad del agua (ICA)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Visualización de la variación espacial y temporal de la calidad del agua - Método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados regularmente en el laboratorio. - Permite evaluar la calidad del agua para usos generales. - Permiten una fácil interpretación de los datos de acuerdo a los factores y parámetros. - Identifican tendencias de la calidad del agua en áreas problemáticas - Mejora la comunicación con la sociedad y por ende su concientización sobre los criterios de la calidad del agua. - Contribuye en la identificación de prioridades con fines de gestión y normatividad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se encuentra limitado espacial y temporalmente por lo que puede interpretarse erráticamente en un lugar y épocas específicas. - La mayoría de ICAs están diseñados para ecosistemas y regiones específicas, por lo que su aplicación universal no puede ser factible debido a las características ambientales que presentan cada recurso hídrico. - Pueden ser muy subjetivos y sesgados en cuanto a su formulación. - Presenta información parcial de la calidad del agua de una cuenca por lo que un solo índice no puede ser representativo de todo el funcionamiento del sistema. - No se toma en cuenta las interacciones entre los parámetros. - Los resultados son altamente sensibles en función de la estructura del índice.

Fuente: (Nasiri et al., 2007; Torres et al., 2009; Torrez, 2018)

Elaboración: Autor 2022

2.2.2 Índice NSF

El NSF WQI fue desarrollado en 1965 por Brown, este como una versión modificada del índice de Horton (Uddin et al., 2021). Cabe señalar que el índice NSF fue el primer índice numérico para indicar patrones de contaminación acuática en diferentes dominios, el cual fue respaldado por la Fundación Nacional de Saneamiento de Estados Unidos (NSF). Para su creación se basaron en la técnica de investigación Delphi, basado en la opinión de expertos, la cual presenta una mayor rugosidad en cuanto a la selección de parámetros y la asignación de pesos (Torrez, 2018).

Al igual que el índice de Horton este contiene cuatro componentes básicos que son:

Selección de parámetros; en la que se dividen en cinco grupos, parámetros físicos (temperatura, turbidez y sólidos totales), parámetros químicos (potencial de hidrógeno y oxígeno disuelto), parámetros microbiológicos (coliformes fecales y la demanda bioquímica de oxígeno), parámetros de nutrientes (fosfatos y nitratos), el último grupo corresponde a los parámetros tóxicos (pesticidas y compuestos tóxicos). Cabe señalar que los parámetros tóxicos son omitidos en los diferentes estudios, debido a factores como la falta de datos, disponibilidad, etc.

Subindexación de los parámetros, estos están basados en una escala de 0 a 1, teniendo en cuenta que el valor de 1 corresponde a la concentración medida del parámetro que se encuentren dentro del valor orientativo (límite máximo permisible) y siendo 0 de manera viceversa.

Ponderación de los pesos, el modelo original de la NSF consideraba valores de peso para DO (0.17), FC (0.16), pH (0.11), DBO (0.11), temperatura (0.10), fosfato total (0.10), nitratos (0.10), turbidez (0.08) y sólidos totales (0.07), esto basado en la variable de importancia ambiental de los parámetros para la determinación de la calidad del agua y finalmente se aplican ya sea la función aditiva o la función multiplicativa para determinar el valor de WQI cuyo resultado se encuentra relacionado con el potencial impacto que genera en el medio ambiente.

Valoración o categorización de 100 a 0 puntos, teniendo en cuenta que valores cercanos a 100 representa una calidad de agua muy buena y valores cercanos a cero una calidad de agua mala (Pesántez & Roldán, 2021; Torrez, 2018; Uddin et al., 2021).

Es importante recalcar que el índice NSF evalúa la calidad del agua de manera general, por lo que no incorpora otras funciones para evaluaciones específicas como uso de agua para consumo humano, agricultura, recreación, entre otros esto según Abbasi y Abbasi (2012). Es importante mencionar que a pesar de que el índice fue creado en base a las características de los ríos Norteamericanos su aplicación es a nivel global; a nivel de Sudamérica países como Perú, Brasil, Colombia han utilizado este índice para la valoración de la calidad de diferentes ríos para consumo humano (Torrez, 2018). Finalmente en términos de aplicabilidad es sumamente factible, esto

debido a que se puede adaptar y modificar de acuerdo al sistema acuático en estudio (González et al., 2013).

2.2.3 Índice Dinius (1978), versión modificada del índice NSF

El índice de Dinius inicialmente fue elaborado como un sistema de contabilidad social rudimentario en 1972. Dinius propuso una nueva versión basada en índices sugeridos por Horton, Brown, entre otros autores (Pesántez & Roldán, 2021; Torrez, 2018). Para la elaboración del índice, el procedimiento requirió de dos procesos, primero se creó un panel conformado por siete miembros expertos en temas de calidad de agua, posteriormente se aplicó la técnica Delphi y finalmente se calculó el índice basado en las normas de calidad del agua mismas que fueron indicadas por las evaluaciones del panel. Cabe señalar que seis de los siete panelistas eran científicos de la calidad del agua y uno del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Dinius, 1987). En este índice modificado se añadió un parámetro más (nitratos), quedando así un total de 12 parámetros: oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), coliformes totales (CT), E coli (CF), dureza (Du), cloruros (Cl⁻), alcalinidad (Alc), potencial de hidrógeno (pH), conductividad específica (CE), temperatura (T) y color (Col).

A diferencia del índice NSF, el índice de Dinius determina la calidad del agua en función de seis tipos de usos como son para consumo humano, pesca, crustáceos, recreación, agricultura e industria. Este índice utiliza una función de agregación multiplicativa y no la aditiva, sin embargo, concuerda en cuanto al análisis del WQI, ya que la escala va desde 100 hasta 0, siendo un valor de 100 para una agua en perfectas condiciones y 0 para una agua totalmente contaminada y por ende necesita un tratamiento previo para sus diferentes usos (Dinius, 1987).

2.2.4 Índice de Oregon (1980)

El índice de calidad de agua de Oregon OWQI por sus siglas en inglés, fue desarrollado para evaluar y analizar el monitoreo mantenido por el Laboratorio del Departamento de Calidad Ambiental de Oregon (Estados Unidos), para poder determinar los posibles impactos de diferentes fuentes de contaminación en variedad de condiciones. De tal forma que el índice expresa la calidad del agua en un número simple teniendo en cuenta ocho parámetros como: Temperatura, Oxígeno disuelto, DBO, pH, Sólidos totales, Nitrógeno total, Fósforo total y Coliformes fecales (Brown, 2017).

Para la creación del índice se utilizó la metodología Delphi basado en el panel de expertos, para la generación de los subíndices se utilizaron transformaciones logarítmicas debido a que presentan ventajas de cambiar en magnitud los niveles de deterioro que aportan un potencial de impacto alto. En sus inicios el índice utilizaba una función de promedio geométrico ponderado, sin embargo, años después fue cambiado por el promedio armónico cuadrado (Dojlido et al., 1994).

Es importante señalar que las puntuaciones del WQI van de 10 considerando un agua de pésima calidad y 100 calidad de agua ideal (Brown, 2017).

2.2.5 CCME (2001), versión reformada del índice BCWQI

El comité técnico Canadian Council of Ministers of Environment (CCME) desarrolló un índice para uso nacional, mismo que se basó en la adaptación del índice de calidad del agua de la British Columbia (BCWQI), el cual se fundamenta de manera general en proteger los diferentes cuerpos de agua para usos específicos como: abastecimiento de agua potable, irrigación, recreación, vida silvestre, vida acuática y uso pecuario. En tal sentido, el uso de variables o parámetros para la aplicación del índice CCME se realiza en base al sitio, según el uso de agua y la disponibilidad de datos (Torrez, 2018).

Este índice es ampliamente utilizado debido a su facilidad de aplicación y porque proporciona flexibilidad en la elección de los parámetros de calidad del agua que se incluirán en el modelo. EL índice establece un límite de mínimo cuatro parámetros, los cuales estarán a prioridad del usuario, a diferencia de los otros índices este no incluye el cálculo de los subíndices, lo cual se puede considerar como una deficiencia del modelo, así mismo la ponderación de parámetros (asignación de pesos) no se incluye dentro del mismo, otra de las diferencias es que dicho índice utiliza una función de agregación diferente a los anteriores (Uddin et al., 2021), misma que se explica en la ecuación (1).

$$WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad (1)$$

Donde los factores F_1 , F_2 y F_3 se definen como el alcance, la frecuencia y la amplitud respectivamente. El primer factor (alcance, F_1) hace referencia al porcentaje de los parámetros totales que no cumplen los objetivos deseables, el segundo factor (frecuencia, F_2) es el porcentaje de ensayos individuales que no cumplieron con el objetivo de calidad y el tercer factor (amplitud, F_3) determina la cantidad de valores de prueba que no cumplieron los objetivos. Cabe señalar que, en el cálculo de la amplitud se debe tener en cuenta la excursión (número de veces en la que una concentración es mayor que el objetivo), la suma normalizada de excedencias (nse). Correspondiente a la categorización para clasificar la calidad del agua es un tanto subjetiva por lo que sería adecuado basarse en información disponible, juicio de expertos o expectativas del público (Torrez, 2018; Uddin et al., 2021). Un dato importante es que según Abbasi y Abbasi (2012) este índice muy aparte de determinar la calidad del agua ha servido para el desarrollo y validación de nuevos índices.

2.3 Elaboración de índices de calidad del agua

Existen diferentes metodologías para la elaboración de un índice de calidad del agua; de acuerdo a las características del cuerpo de agua (lénticas o lóxicas), la forma de calcular el valor de calidad y los parámetros que se tienen en cuenta en la formulación (Caho & López, 2017). En tal sentido determinar la calidad del agua mediante la elaboración de un índice propio implica un trabajo mucho más amplio en comparación con la aplicación de un ICA ya establecido por otro autor (Sierra, 2011). En la *Figura 1* se muestra el procedimiento metodológico de la construcción de un índice de calidad del agua.

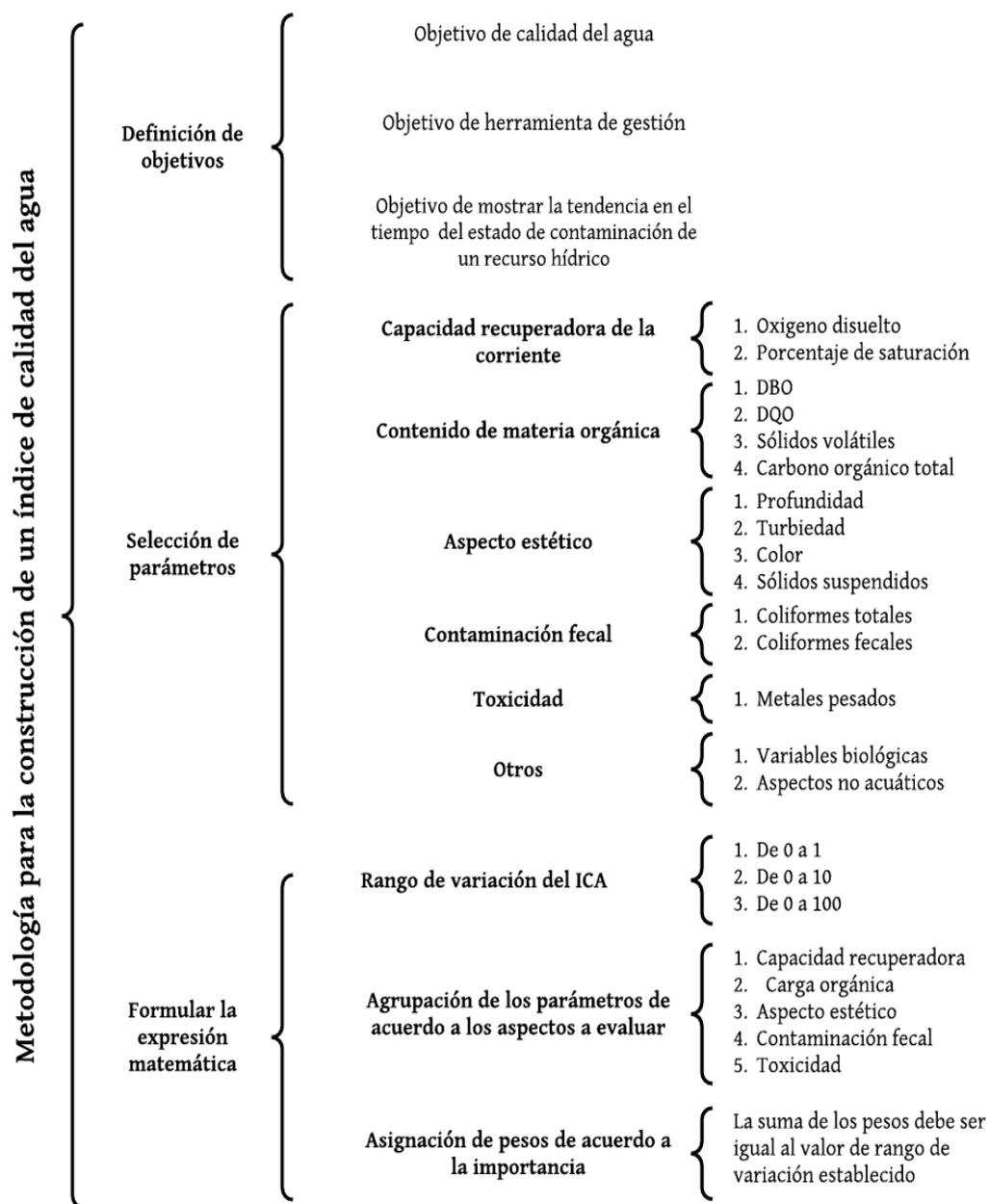


Figura 1: Pasos para la elaboración de un índice de calidad del agua

Fuente: (Sierra, 2011)

Elaboración: Autor 2022, modificado a partir de (Sierra, 2011)

El paso 1 corresponde a la definición de los objetivos, este punto debe estar muy claro ya que será fundamental para ejecutar los pasos posteriores.

El paso 2 es seleccionar los parámetros que se incluirán en el ICA se debe tomar en cuenta factores como los recursos económicos, el tiempo y si los parámetros son lo más representativos posibles, así mismo, la selección se realiza de acuerdo con los términos que se desee (carga orgánica, efecto recuperador, contaminación fecal, aspectos estéticos, toxicidad, etc.).

El paso 3 implica formular la expresión matemática para calcular el valor del ICA; para construir la ecuación se tiene en cuenta tres aspectos: a. Establecer el rango de variación del ICA esto dependerá del estudio que se esté realizando (de 0 a 1, de 0 a 10 o de 0 a 100); b. Agrupar las variables seleccionadas en los términos a evaluar los cuales se mencionan en el paso 2, un dato importante es la dependencia de los parámetros, ya que si son dependientes se agrupan en un mismo término y se multiplican por ejemplo la turbiedad, el color y los sólidos suspendidos, en el caso que el parámetro sea independiente este se agrupa en un solo término; c. Asignación de los pesos a cada término de acuerdo a la importancia que tiene en el ICA, cabe recalcar que la suma de los pesos debe dar el máximo valor del rango de variación del índice de calidad del agua (Sierra, 2011)

2.4 Proceso de jerarquía analítica

El método del proceso de jerarquía analítica (AHP) fue desarrollado por Thomas Saaty en la década de 1970. Es una técnica para la toma de decisiones en entornos complejos en los que se consideran muchas variables o criterios en la priorización y selección de alternativas. El AHP se basa en determinar las ponderaciones relativas de los parámetros disponibles, en base a esto se puede seleccionar eficazmente las variables adecuadas entre los parámetros disponibles. El AHP es teóricamente sólido, fácilmente comprensible y de fácil aplicación, así mismo este método está relacionado con la integración de los diversos juicios y preferencias para la toma de decisiones en grupo (Sutadian et al., 2017). Hablando en términos metodológicos se incluyen las tres etapas de la metodología de AHP propuestas en su formulación (Castillejo, 2002).

- Primera etapa (Modelización): es la elaboración de un modelo o estructura en la que se detallan aspectos relevantes para la resolución.
- Segunda etapa (Valoración): en esta etapa se incorporan las preferencias, gustos y deseos de los actores mediante los juicios incluidos en las denominadas matrices de comparaciones pareadas, estas reflejan una comparación de elemento frente a otro respecto a un atributo o propiedad en común

- Tercera etapa (priorización o síntesis): se toma en cuenta las diferentes prioridades que considerarán para la resolución del problema, estas pueden ser prioridades locales, globales o totales.

2.4.1 Ventajas e inconvenientes del proceso de jerarquía analítica (AHP)

Muchos investigadores han utilizado el AHP como un método de análisis de decisiones multicriterio para determinar las ponderaciones de diferentes variables, se ha utilizado en áreas como: la educación, la salud, el turismo, el medio ambiente, etc.; debido a su fácil aplicación y solidez que presenta (Sutadian et al., 2017). Sin embargo, a pesar de sus ventajas que presenta también genera inconvenientes como se muestra en la *tabla 2*.

Tabla 2: Ventajas e inconvenientes del AHP

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> - Método teóricamente sólido, comprensible y de fácil aplicación en diferentes áreas de investigación. - Proporciona mejor enfoque en los criterios de decisión. - Está relacionada con la integración de los diversos juicios y preferencias para la toma de decisiones en grupo. - Simplicidad: presenta la capacidad de descomponer un problema de decisión compleja utilizando niveles jerárquicos de forma sistemática. - Tiene la capacidad de cuantificar los juicios objetivos y subjetivos de los expertos 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertidumbres en aspectos teóricos como la mala interpretación de la escala y la base axiomática. - No ofrece ninguna orientación constructiva para la estructuración del problema.

Fuente: (Saaty, 2012; Sutadian et al., 2017).

Elaboración: Autor 2022

2.4.2 Proceso de jerarquía analítica en índices de calidad del agua

En el contexto de las ponderaciones de los parámetros del ICA, el AHP permite determinar las ponderaciones más apropiadas para determinados parámetros que reflejan su influencia en la calidad general del agua. Los criterios de comparación por pares de parámetros se emplean para generar valores de ponderación. Esto ayuda a verificar la confiabilidad de las evaluaciones del tomador de decisiones y también reduce las ideas preconcebidas en el proceso de toma de decisiones (Sutadian et al., 2017).

La determinación de la calidad del agua es muy estudiada y de gran interés, por lo que existen una gran cantidad de herramientas para su determinación, una de ellas son los índices de calidad del agua (ICA), sin embargo, estos índices son creados en otras partes del mundo, por lo que una

de las formas de crear un propio índice es mediante el proceso de jerarquía analítica (AHP), para la asignación de pesos de cada parámetro seleccionado, en tal sentido no existen muchos estudios relacionados con este método.

Una investigación realizada por Yussac Tallar & Suen (2015) aplicaron el AHP, en este estudio buscaron desarrollar un índice de calidad propio que tenga la intención de proporcionar un enfoque fácil y de bajo costo para evaluar la calidad del agua en relación con la acuicultura de Indonesia. Para ello, luego del análisis determinaron los parámetros a utilizar en función de diferentes especies de peces, aplicaron el método de proceso de jerarquía analítica (AHP) para definir los pesos de los parámetros seleccionados. En base a esto llegaron a obtener resultados en la que las ponderaciones de los parámetros eran bastante similares por lo que se concluyó que en base a los parámetros y los peces examinados tienen requisitos similares para la calidad del agua.

Otro trabajo realizado por Chakraborty & Kumar (2016) buscaron evaluar la calidad del agua subterránea que estuvo siendo afectado por los vertidos de RSU (Residuos Sólidos Urbanos), en tal caso aplicaron el índice aritmético ponderado y este fue modificado mediante el acoplamiento del proceso de jerarquía analítica (AHP) para obtener información específica. Luego de la aplicación del índice aritmético ponderado se modificó aplicando tres pasos del AHP, en primer lugar, se asignó un peso a cada parámetro de calidad del agua sobre la base de la opinión de un experto utilizando la escala de Satty. La ponderación máxima asignada fue 9, mientras que la ponderación mínima asignada fue 1, donde un número más alto refleja la importancia relativa de cada parámetro en la calidad del agua subterránea. Luego se construyó una matriz para hacer las comparaciones entre parámetros y finalmente mediante la aplicación de diferentes ecuaciones se determinaron los pesos de cada parámetro. Con esto llegaron a obtener resultados en algunos casos muy similares entre el aritmético ponderado y el índice modificado con AHP, llegando a la conclusión que el agua se encontraba muy afectada y de una calidad pobre.

2.4.2.1 Metodología utilizada en el AHP para establecer las ponderaciones de los parámetros en el ICA

El AHP establece las ponderaciones (pesos) de cada parámetro seleccionado en la elaboración de un índice de calidad de agua, por lo que, el procedimiento incluye varias fases (Shen et al., 2015; Sutadian et al., 2017)

Fase 1. Estructurar una jerarquía, en el marco jerárquico se estructura una lista de criterios y subcriterios para la efectividad de la implementación (Shen et al., 2015). En el nivel superior se establece o define un objetivo general, en los niveles inferiores se establecen objetivos específicos, mismos que contribuyen al cumplimiento del objetivo general. En el caso de la elaboración del ICA, el objetivo general es establecer la ponderación de los parámetros de calidad

del agua y el nivel o niveles inferiores son los parámetros de calidad del agua, ya sea de forma individual o en grupo de calidad del agua medidos.

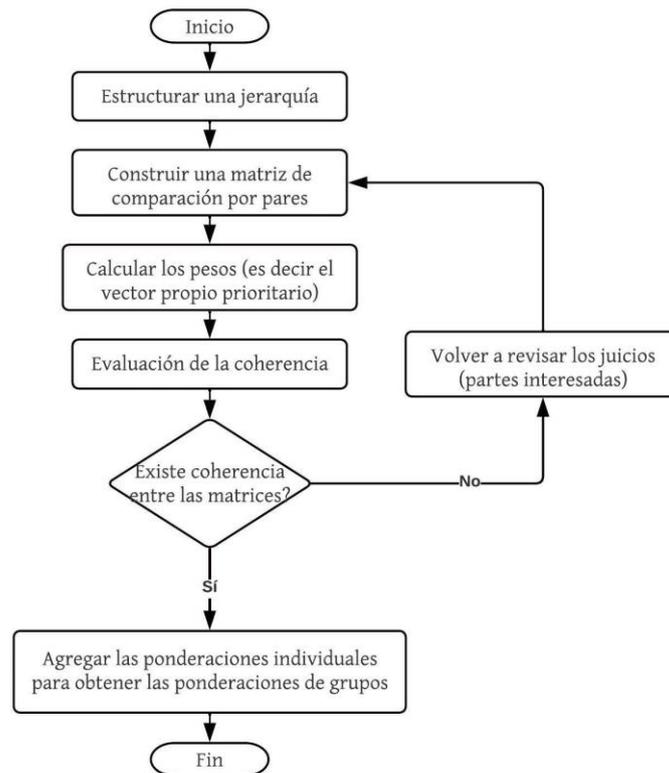


Figura 2: Diagrama de flujo de los pasos de AHP en la ponderación de parámetros para el ICA

Fuente: (Sutadian et al., 2017)

Fase 2. Construir una matriz de comparación por pares, en esta matriz debe incluirse los cuestionarios que serán distribuidos a todos los encuestados, en esta fase se proponen escalas para calificar los juicios de las partes interesadas, según Saaty (1987) es recomendable utilizar la escala de 1 a 9 para el AHP, debido a que proporciona más opciones para analizar la prioridad relativa entre los parámetros, lo cual no ocurre con escalas pequeñas, la interpretación de estos puntos (1-9) se detallan en la *tabla 3*.

Fase 4. Cálculo de los pesos, los pesos se obtienen aplicando el álgebra matricial para determinar el vector propio principal, para luego este ser normalizado convirtiéndose en el peso del parámetro.

Fase 4. Evaluación de la coherencia, aquí se evalúa si el juicio emitido por el encuestado es coherente o no a lo establecido, por lo que se dice que existe una coherencia si se cumple la lógica de la preferencia de la propiedad transitiva; 5. Agregar las ponderaciones individuales para obtener las ponderaciones de grupos, en este caso se hace una agregación para cada nivel

jerárquico, por lo que es recomendable utilizar el método de agregación de prioridades individuales (AIP) (Sutadian et al., 2017) Estos pasos se pueden observar en la *Figura 2* en forma de diagrama de flujo.

Tabla 3: Escala fundamental de puntuación

Puntuaciones de preferencia	Definición	Explicación
1	Igualmente, importante	Ambos elementos tienen la misma prioridad.
3	Moderadamente importante	Un elemento está moderadamente favorecido sobre el otro.
5	Fuertemente importante	La experiencia y el juicio recomiendan encarecidamente preferir un elemento sobre el otro.
7	Importancia muy fuerte	Se da una preferencia muy fuerte a un elemento sobre otro y se demuestra su dominio en la práctica.
9	Importancia extremadamente fuerte	Las pruebas que favorecen una actividad sobre otra son del mayor grado posible de afirmación
2, 4, 6, 8		Se utiliza para representar el compromiso entre las preferencias enumeradas anteriormente
Recíprocos		Los recíprocos se utilizan para la comparación inversa

Fuente: (Saaty, 1987; Shen et al., 2015)

Elaboración: Autor 2022

2.5 Análisis de correlación

En muchos de los casos es importante determinar si existe relación entre diferentes variables de estudio o predecir el valor de una de ellas conociendo el valor de otra. Como en los estudios de análisis suele utilizarse una muestra, obteniéndose en realidad un estimado del coeficiente de correlación poblacional. Sin embargo, en dicho análisis se debe considerar dos aspectos importantes; primer aspecto es la magnitud, la cual refleja la intensidad de la asociación entre las dos variables, la magnitud se mide en rangos de 0 a 1, donde los valores cercanos a 0 indican que las variables no están relacionadas, es decir las variables son independientes; el segundo aspecto es el signo, este indica la asociación de los valores de ambas variables, en tal sentido si el signo es positivo (+) refleja que valores altos de una variable corresponden a valores altos de la otra o viceversa, por otra parte si el signo es negativo (-) explica lo contrario que valores altos de una variable corresponden a valores pequeños de otra variable o viceversa, en base a lo mencionado el coeficiente de correlación no presenta unidades (Camacho, 2008).

2.5.1 Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson, es representado por la letra r (Camacho, 2008), se mostró por primera vez en 1895 esta importante medida en términos matemáticos como en la ecuación (2), es una medida considerablemente utilizada a nivel global en diversas áreas del quehacer científico, desde estudios técnicos, econométricos o de ingeniería; hasta investigaciones relacionadas con las ciencias sociales, del comportamiento o de la salud (Lalinde et al., 2018). El coeficiente de Pearson tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal (Restrepo & Gonzáles, 2007).

$$r_{x,y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

Donde en la igualdad, σ_{xy} es la covarianza de (x, y) y σ_x, σ_y representan la desviación estándar de cada variable (x, y) (Pesántez & Roldán, 2021). La forma de interpretar los resultados en el coeficiente de Pearson es de la siguiente manera; cuando $r = 0$ indica que no existe una relación lineal entre las variables (correlación nula), sin embargo, la relación se hace más fuerte a medida que aumenta el valor absoluto de r y finalmente se aproxima a una línea recta cuando el coeficiente se acerca a -1 o $+1$. Por lo que una correlación perfecta de -1 o $+1$ significa que todos los datos se encuentran exactamente en la línea recta, ya sea en los ejes positivos o negativos de acuerdo al signo (Schober et al., 2018).

2.5.2 Correlación de Spearman

El coeficiente de Spearman se suele abreviar como ρ (rho) o “ r_s ”. Básicamente, un coeficiente de Spearman es una correlación de Pearson calculado con los rangos de los valores de cada una de las 2 variables en lugar de sus valores reales, así mismo es un coeficiente muy útil para un tamaño muestral menor a 30 (Pesántez & Roldán, 2021). Este método de correlación es aplicable tanto a datos no paramétricos como a datos ordinarios, presentando resultados relativamente robustos frente a datos atípicos presentes en las variables (Schober et al., 2018). Al igual que el coeficiente de Pearson, el coeficiente de Spearman también oscila entre -1 y $+1$. Puede interpretarse como ausencia de relación lineal y ($\rho = 0$) y una relación monótona perfecta ya sea negativa o positiva ($\rho = -1$ o $+1$). La fórmula para el cálculo de dicho coeficiente se describe a continuación:

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3)$$

Donde n es el valor de la cantidad de sujetos que se clasifican, x_i es el rango de sujetos i con respecto a una variable y_i es el rango de sujetos i con respecto a una segunda variable y d_i es la diferencia entre los rangos de x y y ($d_i = X_i - Y_i$) (Mondragón, 2014).

2.6 Legislación aplicable vigente

2.6.1 Constitución de la república del Ecuador

El Art. 12 de la Constitución del Ecuador correspondiente al Título 1, capítulo segundo: Derechos del Buen Vivir, sección primera agua y alimentación reconoce que el derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida. En tal sentido en el Art. 66 se garantiza el acceso al agua a todas las personas y en el Art. 264 menciona que se otorga a los gobiernos municipales la competencia para prestar el servicio de agua potable (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008).

Correspondiente a la privatización y acaparamiento del agua y sus fuentes se menciona en el Art. 282 además de esto enfatiza que el Estado regulará el uso y manejo de agua de riego para la producción de alimentos, bajo los principios de equidad, eficiencia y sostenibilidad ambiental.

Finalmente, en el Art. 411 garantiza el manejo, conservación y recuperación del recurso agua, cauces hidrográficos y ecológicos que tengan que ver con el ciclo hidrológico, siendo de primer orden la sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008).

2.6.2 Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA)

En el Anexo 1 NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA, del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente, se considera:

- Los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado;
- Los criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos; y,
- Métodos y procedimientos para determinar la presencia de contaminantes en el agua.

La norma tiene como objetivo la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, en lo relativo al recurso agua, protegiendo la calidad del recurso agua para salvaguardar y preservar la integridad de las personas, de los ecosistemas y sus interrelaciones y del ambiente en general. Las acciones tendientes para preservar, conservar o recuperar la calidad del recurso agua deberán realizarse en los términos de la presente Norma.

2.6.3 Criterios para la calidad del agua

En cuanto a los diferentes criterios para la calidad de agua se menciona de manera general la clasificación de acuerdo con los usos, y de acuerdo con los usos actuales, para este caso de estudio

tomando en cuenta que el río Tomebamba es fuente de abastecimiento de agua para la planta de tratamiento de El Cebollar.

- Uso de agua como fuente de abastecimiento para consumo humano previo tratamiento.

Los parámetros de calidad en referencia a los usos antes mencionados se muestran en la tabla 1 (Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional), tabla 2 (Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requieran desinfección) y la tabla 6 (Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola), del Anexo 1 del Libro VI del TULSMA.

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Delimitación del área de estudio

3.1.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio (río Tomebamba) está ubicada en la provincia del Azuay, atraviesa la parroquia de Sayausí, misma que corresponde a una de las 15 parroquias urbanas del cantón Cuenca y bordea el centro histórico de Cuenca. La subcuenca del Tomebamba recibe aguas del río Yanuncay, continuando su cauce hasta unirse con las aguas del río Machángara, para finalmente desembocar en la cuenca del río Paute. La cuenca del Paute forma a su vez parte de la cuenca del Santiago- Namangoza que corre hacia el Amazonas y termina en el océano Atlántico (Carrasco et al., 2010). En la *Figura 3, 4 y 5*, se representa la ubicación geográfica del área de estudio (río Tomebamba) en relación con el territorio nacional.

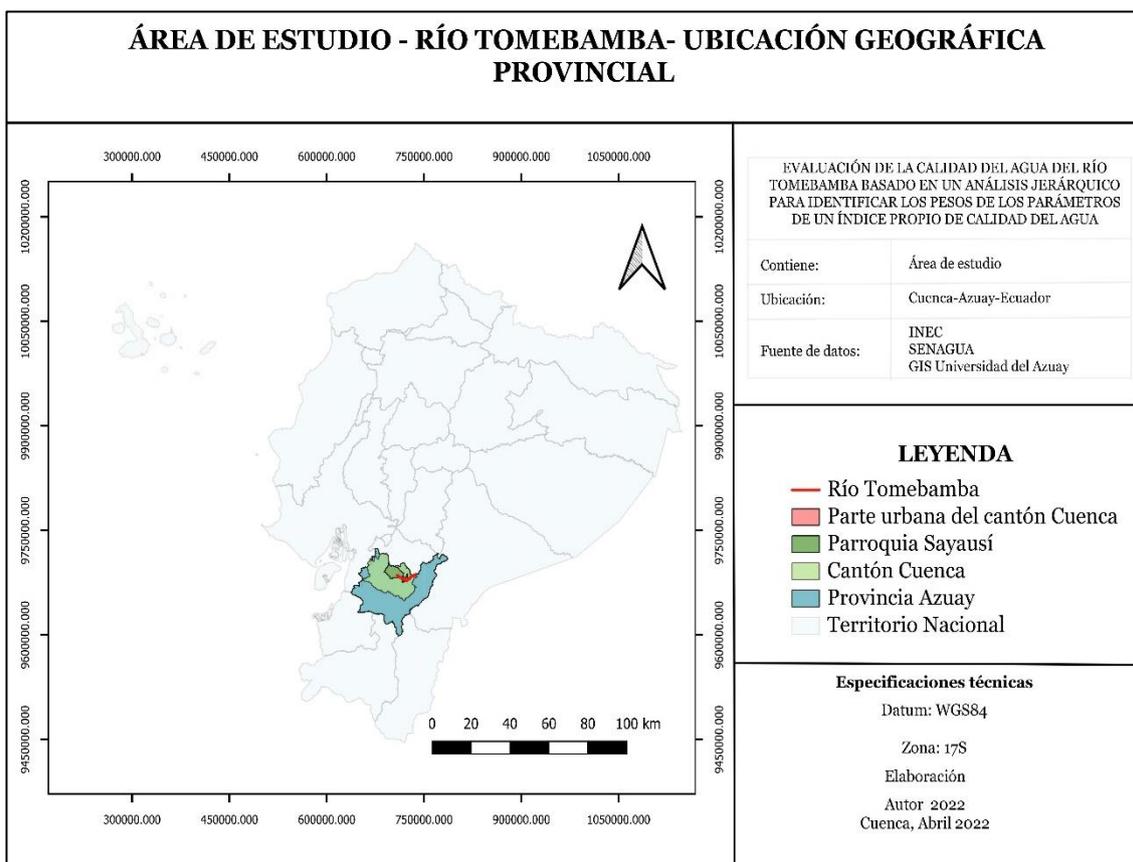


Figura 3: Ubicación del área de estudio (Río Tomebamba) a nivel de territorio nacional

Elaboración: Autor 2022

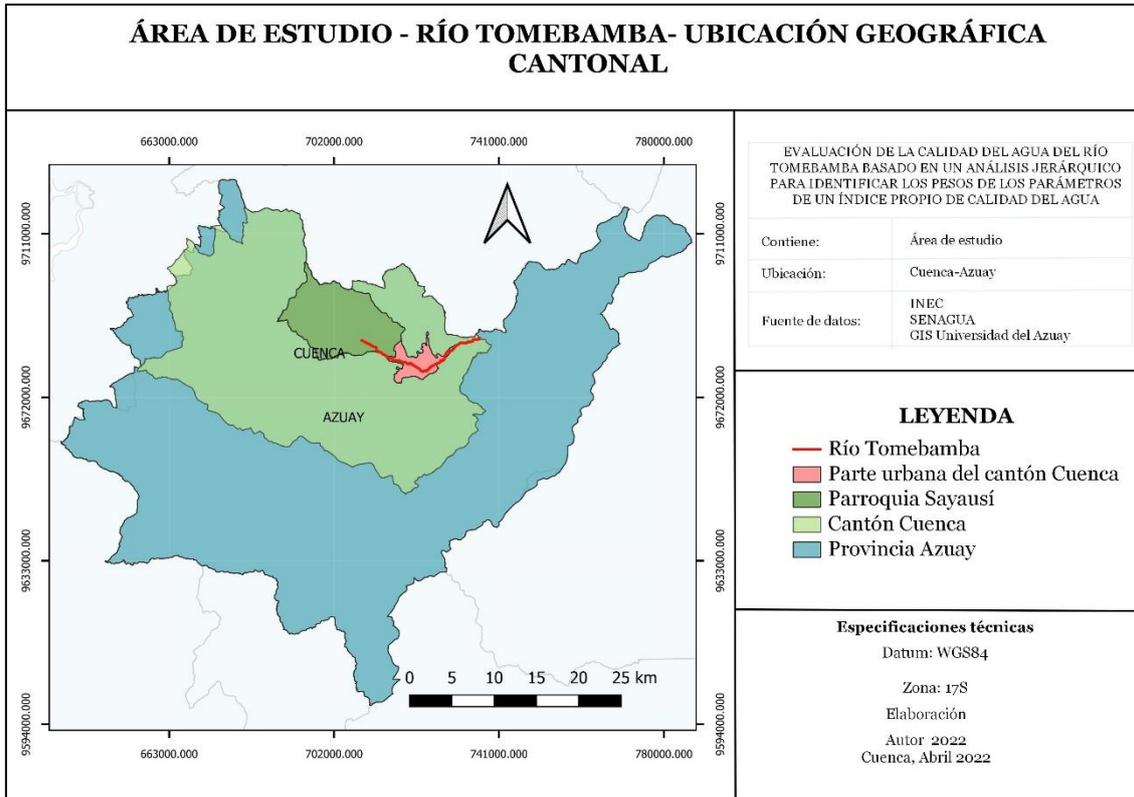


Figura 4: Ubicación del área de estudio (Río Tomebamba) a nivel de territorio provincial - Azuay

Elaboración: Autor 2022

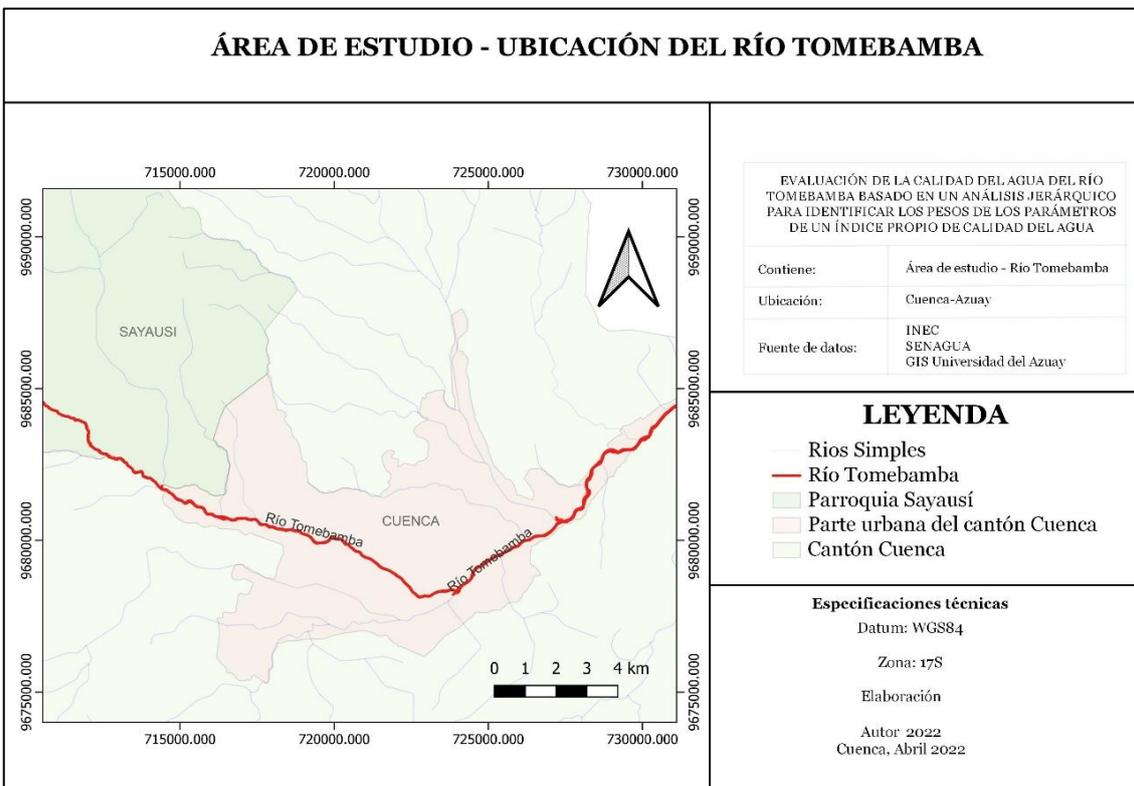


Figura 5: Ubicación del área de estudio (Río Tomebamba) a nivel de territorio cantonal - Cuenca

Elaboración: Autor 2022

3.1.2 Descripción del área de estudio

El río Tomebamba nace en la confluencia de distintas lagunas (sector Tres Cruces) del Parque Nacional Cajas, provincia del Azuay cantón Cuenca, fluye en dirección sureste hacia la ciudad de Cuenca, constituye una de las subcuencas del río Paute y cuenta con un área de 380 km² aproximadamente el cual corresponde al 10.38 % del área total de las subcuencas dentro del cantón según el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca, presenta un caudal promedio de 11.88 m³/s y un caudal pico de 154.68 m³/s. Aguas abajo el río Tomebamba se intercepta con las quebradas de Sacay y Milchichig y con los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara (Delgado & Camargo, 2013; Pauta et al., 2019), *ver figura 5*. Este río es la fuente de agua más antigua de la ciudad de Cuenca para el abastecimiento a la planta potabilizadora “El Cebollar”, misma que abastece de agua potable a un 40% del área urbana de Cuenca (Segarra, 2016).

3.1.3 Clima

El clima no solo está ligado a factores atmosféricos, sino también a la geografía física que presenta la zona; el área de estudio presenta una amplia variación altitudinal y por ende un amplio gradiente de temperatura. En base a lo mencionado y de acuerdo con el Atlas Geográfico Nacional del 2013, el cantón cuenca cuenta con diferentes tipos de clima:

- Ecuatorial de alta montaña
- Ecuatorial mesotérmico semi húmedo
- Tropical megatérmico semi húmedo
- Nival
- Tropical megatérmico húmedo
- Tropical megatérmico seco

Sin embargo, el río Tomebamba de acuerdo al Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca (GADM-CUENCA, 2015) cuenta con dos pisos climáticos bien definidos; 1. Piso templado interandino, presenta alturas desde 2500 – 3200 m.s.n.m. y temperaturas de 10 – 15 °C; 2. Piso climático frío andino, presenta alturas desde 3200 – 4700 m.s.n.m. y sus temperaturas oscilan entre 1 – 10 °C (Segarra, 2016). Las precipitaciones varían de acuerdo con el tipo de clima, las mismas van desde los 500 mm anuales como mínimas y 5000 mm anuales como máximas.

3.1.4 Vegetación y bosques

La vegetación a lo largo del trayecto del río es muy abundante, en la que predominan hierbas, arbustos y árboles de gran tamaño. De acuerdo con su clasificación general, el páramo es predominante con un 70 %, bosque nativo 14 %, pastos 11 % y otros 5 %. Algunas de las especies de flora son: Cola de caballo (*Equisetum bogotense*), Cacho de venado (*Huperzia crassa*), Sacha

oca (*Oxalis phaeotricha*), Romerillo (*Calceolaria rosmarinifolia*), Mortiño (*Vaccinium floribundum*), Gullán (*Passiflora cumbalensis*), Grama (*Paspalum bonplandianum*).

En la Subcuenca del río Tomebamba el Ministerio del Ambiente en el año 1985, declaró áreas de bosques y vegetación protectora a bosques nativos y páramos. En la *tabla 4* se detallan algunas características.

Tabla 4: Áreas de Bosques y Vegetación Protectora constituyentes en la subcuenca del río Tomebamba

Bosque protector	Hectáreas (ha)	Descripción
Machángara – Tomebamba	42912.68	Un total de 10341 ha, se ubican en la subcuenca del río Tomebamba
Dudahuayco	1 815	Todas están ubicadas en la subcuenca
Yunguilla	309	Todas están ubicadas en la subcuenca
Guabidula	705	Todas están ubicadas en la subcuenca
Fierrolona	213	Todas están ubicadas en la subcuenca
Parque Nacional Cajas	28500	Un total de 13500 ha, se ubican en la subcuenca del río Tomebamba

Fuente: (Segarra, 2016)

Elaboración: Autor 2022

3.2 Base de datos

3.2.1 Evaluación de la base de datos

La base de datos fue provisionada por la Empresa Pública de Telecomunicaciones, Agua potable y alcantarillado (ETAPA EP), la cual facilitó los datos históricos registrados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los diferentes puntos de monitoreo realizada por la empresa en la subcuenca del río Tomebamba:

- Oxígeno disuelto
- Potencial de Hidrógeno (pH)
- Temperatura del agua y temperatura ambiente
- Conductividad
- Coliformes totales y fecales
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
- Nitratos
- Nitritos
- Fósforo total
- Fosfatos
- Turbiedad
- Sólidos totales

- Color aparente
- Alcalinidad total
- Dureza total, cálcica y magnésica
- Calcio
- Magnesio

De igual manera la empresa proveyó los datos de las ubicaciones de las estaciones de monitoreo a lo largo de la subcuenca del Tomebamba, teniendo en cuenta que existen 18 estaciones antiguas desde el año 1984 y 7 estaciones nuevas, sumando un total de 25 estaciones a lo largo del río (ver tabla 5).

Tabla 5: Ubicación de las 25 estaciones de monitoreo de la calidad del agua a lo largo de la subcuenca del río Tomebamba

Subcuenca	COD_ANT	COD_NUE	X	Y	ALTURA	DESCRIPCIÓN
RÍO TOMEBAMBA	Tb4	TOM-TOM-050	723863.57	9678373	2478	Tomebamba A.J. Yanuncay
	Mi1	TOM-MIL-CONTROL	726293.58	9680083	2442	Milchichig A.J. Tomebamba
	Tb2	TOM-TOM-030	718312.58	9680379	2590	Tomebamba D.J. Q. Sacay
	Tb6	TOM-TOM-CONTROL	727209.58	9680510.9	2427	Tomebamba A.J. Machángara
	Mi30	TOM-MIL-010	722254.97	9681646.1	-	Milchichig barrio La Floresta
	S1	TOM-CU-CONTROL	714409.6	9681789	2693	Río Culebrillas A.J. Tomebamba
	M0	TOM-MZ-010	709416	9682474	2913	Mazán en cabecera
	M1	TOM-MZ-CONTROL	712550.6	9682776	2770	Mazán A.J. Tomebamba
	Tb0	TOM-TOM-005	712656	9682796	2773	Tomebamba A.J. Mazán
	S2	TOM-CU-010	713191.62	9685501	3018	Río Culebrillas Captación
	Ch1	TOM-LL-CONTROL	708352.63	9685557.1	3035	Llaviucu A.J. Quinuas
	Ch0	TOM-LL-005	706505	9685654	3146	Llaviucu luego de la laguna
	Tbh y Vía 2	TOM-QN-CONTROL	707390	9686980	3178	Quinuas A.J. Llaviucu
	-	TOM-QN-005	705774	9688658	3293	Quinuas después de Chirimachai
	-	SIN CÓDIGO	705766	9688717	3288	Quinuas efluente de Chirimachai
	-	TOM-QN-010	705590	9689078	3290	Quinuas antes de Chirimachai
	Q3	TOM-QN-015	704885	9689973	3362	Quinuas después de piscícolas
	Vía 4	TOM-QN-045	698621	9691536	3958	Quebrada afluente laguna Apicocha
	Q2	TOM-QN-030	701616	9692425	3604	Quinuas A.J. Taquiurcu
	Q1 y/o Mt y Vía 3	TOM-QN-035	699440	9692429	3781	Quinuas salida de laguna Patoquinuas
	Vía 6	TOM-QN-060	696768	9692532	3940	Salida laguna Illincocha
	Vía 2	TOM-QN-025	701924	9692611	3551	Quinuas D.J. Taquiurcu (puente)
	Mt2	TOM-QN-080	700490	9692766	3783	Taquiurcu (Salida Laguna)
	-	TOM-QN-065	696142	9692793	4047	Entrada Laguna Illincocha
	-	TOM-QN-055	697680	9692802	3900	Salida laguna Toreadora

Fuente: ETAPA EP
Elaboración: Autor 2022

3.2.2 Selección de estaciones de monitoreo

Tabla 6: Estaciones seleccionadas

<i>Estaciones seleccionadas de la subcuenca río Tomebamba</i>			
CÓDIGO	Y	X	Z
TOM-TOM-CONTROL	9680568	727235	2443
TOM-MIL-CONTROL	9680251	726100	2446
TOM-TOM-050	9678389	723775	2500
TOM-TOM-030	9680372	718238	2615
TOM-CU-CONTROL	9681762	714412	2697
TOM-TOM-005	9682972	712280	2762
TOM-LL-CONTROL	9685557.07	708352.63	3035
TOM-QN-005	9688658	705774	3293
TOM-QN-015	9689973	704885	3362
TOM-QN-025	9692611	701924	3551

Fuente: ETAPA EP
Elaboración: Autor 2022

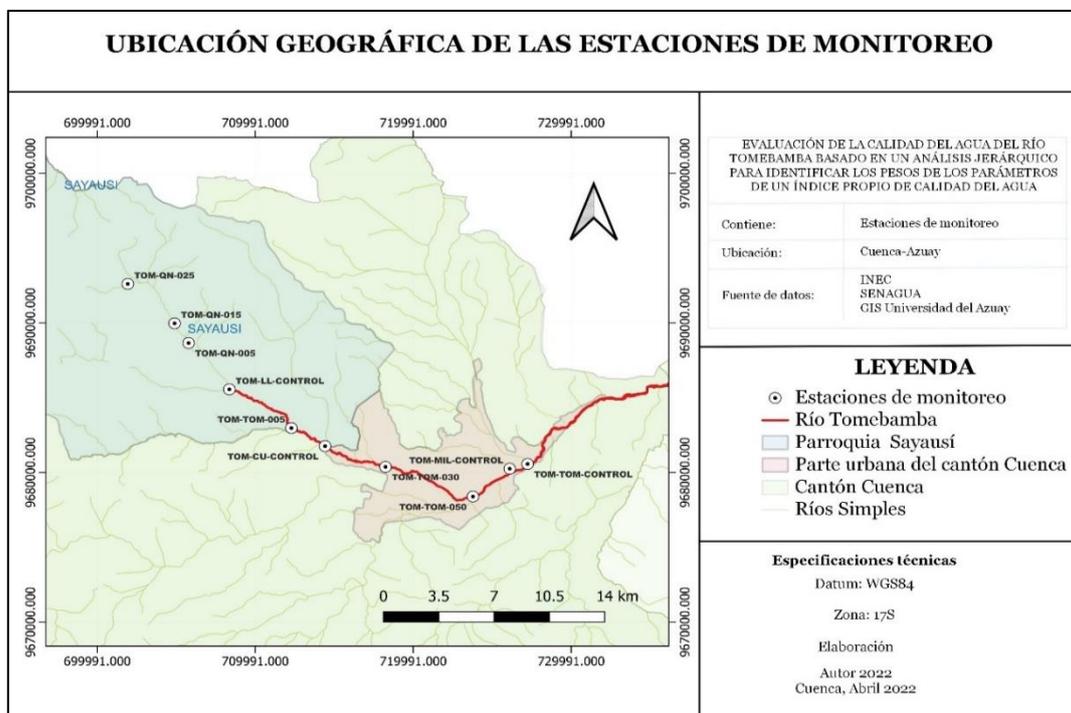


Figura 6: Ubicación de las estaciones de monitoreo seleccionadas
Elaboración: Autor 2022

De las 25 estaciones de monitoreo que cuenta la empresa ETAPA EP se escogieron un total de 10 estaciones, de las cuales 6 corresponden a las estaciones nuevas y 4 estaciones antiguas, teniendo en cuenta que estas 10 estaciones se distribuyen a lo largo de la subcuenca del Tomebamba. En la *tabla 6* se puede observar las coordenadas UTM de las estaciones y en la *Figura 6* la ubicación

de las mismas. Cabe recalcar que en el presente estudio se utilizó la misma codificación que utiliza la empresa.

3.2.3 Justificación para la selección de estaciones de monitoreo

Para la selección de las 10 estaciones de monitoreo se tomó en cuenta los siguientes criterios:

- a) Continuidad de los datos: de las 25 estaciones de monitoreo de la calidad del agua, las seleccionadas presentan datos registrados continuamente.
- b) Representatividad: las estaciones abarcan toda la subcuenca del río, siendo la primera estación que abarca la zona donde nace el río TOM – QN – 025 y la última donde termina la subcuenca TOM – TOM – CONTROL, por ende, cubren toda la longitud del río Tomebamba.
- c) Parámetros de calidad: en dichas estaciones se han medido todos los parámetros necesarios para el cálculo de los índices de calidad del agua.

Es importante señalar que la ubicación de las 10 estaciones se divide en tres zonas; siendo la primera, la parte alta que cubren las estaciones TOM – QN – 025, TOM – QN – 015 y TOM – QN – 005; la segunda, la parte media que abarcan las estaciones: TOM – LL – CONTROL, TOM – TOM – 005 y TOM – CU – CONTROL; finalmente la parte baja que corresponde a las estaciones: TOM – CU – CONTROL, TOM – TOM – 030, TOM – TOM – 050 y TOM – TOM – CONTROL.

3.2.4 Selección de parámetros para estimar la calidad del agua con índices ya establecidos

Los parámetros de la base de datos fueron: porcentaje de oxígeno disuelto saturado (%), potencial de hidrógeno, alcalinidad total (mg/l), coliformes fecales y totales (NMP/100 ml), color aparente (UC), conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$), dureza total (mg CaCO_3/l), demanda bioquímica de oxígeno (mg/l), fosfatos (mg/l), fósforo total ($\mu\text{g}/\text{l}$), nitritos y nitratos ($\mu\text{g}/\text{l}$), sólidos totales (mg/l), temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$), turbiedad (NTU) y oxígeno disuelto (mg/l).

3.2.5 Justificación para la selección de parámetros

De los parámetros antes mencionados, para el cálculo del índice de Dinius se utilizó 12 parámetros, para el índice de Oregón se usó 8 parámetros, para el índice NSF se usó 9 parámetros y el índice CCME no tiene restricción en el número de parámetros, pero al menos de ser cuatro. Los parámetros indicados en la sección 3.2.4 son los utilizados para el cálculo de los índices antes mencionados.

3.3 Determinación de la calidad del agua mediante los índices de calidad del agua (ICA_s) ya existentes

En esta sección se abordan las diferentes metodologías ya existentes, utilizadas para determinar la calidad del agua de la subcuenca del río Tomebamba, en base a los parámetros que se seleccionaron anteriormente.

3.3.1 Metodología para determinar la calidad del agua mediante el Índice NSF

El índice NSF utiliza 9 parámetros para la determinación de la calidad del agua; cambio de temperatura, turbidez, sólidos totales, potencial de hidrógeno, porcentaje de oxígeno disuelto saturado, coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, fosfatos y nitratos (Uddin et al., 2021). El cambio de temperatura se calcula mediante la resta de la temperatura ambiente y la temperatura medida en el agua. Para la agregación del ICA se tomó en cuenta la ponderación de cada parámetro; los cuales se observan en la *tabla 7*.

Tabla 7: Ponderación asignado a cada parámetro

Parámetros	Ponderación
Cambio de temperatura	0.10
Turbidez	0.08
Sólidos totales	0.07
pH	0.11
Oxígeno disuelto	0.17
Coliformes fecales	0.16
DBO	0.11
Fosfatos	0.10
Nitratos	0.10

Fuente: (Uddin et al., 2021)

Elaboración: Autor 2022

En la agregación se aplicó el método aditivo ponderado, el cual se basa en la suma de los productos resultado del subíndice del parámetro por su ponderación, en tal sentido la fórmula aditiva del NSF es la siguiente.

$$WQI = \sum_{i=1}^n S_i * W_i \quad (4)$$

Donde:

S_i: subíndice de calidad para el parámetro i

W_i: coeficiente de ponderación del parámetro (*ver tabla 7*)

n: número total de parámetros

Para el cálculo del ICA se utilizó la plataforma virtual en línea creada por WATER RESEARCH CENTER, en la misma se ingresan datos personales; nombre, correo electrónico, organización,

posteriormente datos de; tipo (lago, arroyo, estanque), fecha y ubicación. Es importante señalar que las ponderaciones que la plataforma asigna a cada parámetro son iguales a los que se presentan en la *tabla 7*.

El valor del índice NSF que proporcionó la plataforma fue interpretado de acuerdo con una escala de clasificación en 5 categorías que va desde 0 hasta 100, tal como se muestra en la *tabla 8*.

Tabla 8: Clasificación según el ICA NSF

Índice de calidad (WQI)	Clasificación
(90-100)	Excelente
(70-89)	Bueno
(50-69)	Medio
(25-49)	Malo
(0-25)	Muy mala calidad

Fuente: (Uddin et al., 2021)

Elaboración: Autor 2022

3.3.2 Metodología para determinar la calidad del agua mediante el Índice de Dinius

El índice de calidad de Dinius indica la calidad general del agua de acuerdo con su uso en específico, para el caso de este estudio se tomó en cuenta el criterio general y consumo humano. El índice toma en cuenta 12 parámetros, mismos que se observan en la *tabla 10*, así también la generación de los subíndices (S_i) y la ponderación (W_i) de cada parámetro. Cabe señalar que estas ponderaciones están basadas en estudios de acuerdo con la importancia de cada parámetro respectivamente (Dinius, 1987).

En tal sentido, el índice utiliza la función multiplicativa para la agregación (*ecuación 5*) y cálculo de ICA, misma que se basa en la multiplicación del resultado de cada subíndice elevado a la ponderación de cada parámetro. El presente estudio al no existir la presencia de cloruros dicha ponderación se dividió proporcionalmente para los 11 parámetros restantes.

$$WQI = \prod_{i=1}^n S_i^{W_i} \quad (5)$$

Donde:

S_i = subíndice de calidad para el parámetro i

W_i = Coeficiente de ponderación del parámetro i

n = número total de parámetros

El valor resultado del ICA se interpretó de acuerdo con la escala de clasificación en un rango de 0 (inaceptable) a 100 (excelente), como ya se mencionó el índice indica la calidad general del agua de acuerdo a su uso. Para este estudio se tomó en cuenta el criterio general y para consumo

humano, es así como, en la *tabla 9* se muestra la clasificación de la calidad del agua (Dinius, 1987).

Tabla 9: Clasificación de la calidad del agua según el ICA para el índice de Dinius

Nivel de contaminación (100 excelente)	Criterio general	Consumo humano	Recreación	Pesca	Mariscos	Agrícola	Industrial
100	Excelente	No es necesario purificar	No es necesario purificar	No es necesario purificar	No es necesario purificar	No es necesario purificar	No es necesario purificar
90	Aceptable	Se requiere purificación menor para consumo					Purificación menor para industrias que requieren agua de alta calidad
80		Consumo riesgoso sin purificación					
70	Contaminado	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminación ligera con la presencia de bacterias	Poco aceptable para peces sensibles	Poco aceptable para mariscos sensibles	Purificación menor para cultivos que requieren agua de alta calidad	No es necesario un tratamiento
60				Inaceptables para peces sensibles	Inaceptable para mariscos sensibles	No es necesario un tratamiento	
50	Altamente contaminado	Poco aceptable para consumo	Poco aceptable el contacto con el agua	Solo para peces resistentes	Solo para mariscos resistentes	Tratamiento extensivo para la mayoría de los cultivos	Tratamiento extensivo para la mayoría de las industrias
40		Inaceptable para el consumo	No se debe tener contacto con el agua - sólo navegación	Solo para peces grandes	Solo para mariscos grandes.	Uso solo para cultivos muy resistentes	
30			Contaminación evidente apareciendo	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	Usar sólo para industrias en bruto
20 10 0			Contaminación evidente - Inaceptable				Inaceptable

Fuente:(Dinius, 1987)
Elaboración: Autor 2022

Tabla 10: Funciones de subíndices y ponderaciones de cada parámetro para el índice de Dinius

Parámetro	Función Subíndice (S _i)	Peso (W _i)
Oxígeno disuelto (OD)	$S_{i_{OD}} = 0.82(OD) + 10.56$	0.109
Coliformes totales (CT)	$S_{i_{CT}} = 136(CT)^{-0.1311}$	0.090
Coliformes fecales (CF)	$S_{i_{CF}} = 106(CF)^{-0.1286}$	0.116
Potencial de hidrógeno (pH)	$S_{i_{pH}} = 10^{0.6803+0.1856*pH}$ Si pH < 6.9	0.077
	$S_{i_{pH}} = 100$ Si pH = 7	
	$S_{i_{pH}} = 10^{3.65-0.2216*pH}$ Si pH > 7	
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	$S_{i_{DBO}} = 108(DBO)^{-0.3494}$	0.097
Diferencia de temperatura (ΔT)	$S_{i_{\Delta T}} = 10^{2.004-0.0382*\Delta T}$	0.077
Conductividad eléctrica (Cond)	$S_{i_{Cond}} = 506(Cond)^{-0.3315}$	0.079
Color (Col)	$S_{i_{Col}} = 127(col)^{-0.2394}$	0.063
Dureza (Dur)	$S_{i_{Dur}} = 552(Dur)^{-0.4488}$	0.065
Cloruros (Cl)	$S_{i_{Cl}} = 391(Cl)^{-0.3480}$	0.074
Alcalinidad total (Alk)	$S_{i_{Alk}} = 110(Alk)^{-0.1342}$	0.063
Nitratos (NO ₃)	$S_{i_{NO_3}} = 125(NO_3)^{-0.2718}$	0.090

*ΔT: Temperatura ambiente – Temperatura del agua

Fuente: (Dinius, 1987)

Elaboración: Autor 2022

3.3.3 Metodología para determinar la calidad del agua mediante el índice de Oregón

El índice de Oregón expresa la calidad del agua por la integración de las mediciones de 8 parámetros: temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), Potencial de hidrógeno (pH), sólidos totales (ST), nitrógeno total (N), fósforo total (P) y coliformes fecales (CF) (Brown, 2017).

Para el cálculo de los subíndices de cada parámetro se aplicaron las diferentes ecuaciones matemáticas ya establecidas las cuales se muestran en la *tabla 11*. A diferencia de los dos índices anteriores en este no se utilizan ponderaciones. El cálculo del nitrógeno total se realizó a partir de los datos de nitratos que registran las estaciones de monitoreo.

El cálculo de ICA se determina mediante la siguiente fórmula de agregación:

$$WQI = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i^2}}} \quad (6)$$

Donde:

S_i = Subíndices del parámetro i (Los subíndices se estimaron utilizando funciones matemáticas promediadas, la transformación logarítmica y la regresión no lineal se utilizaron para generar el subíndice)

n = número de parámetros (8)

El resultado del ICA se interpreta de manera general, clasificándolos en 5 categorías que van en rangos partiendo desde 0 hasta 100, dicha clasificación se muestra en la *tabla 12*.

Tabla 11: Ecuaciones de subíndices de cada parámetro para el cálculo del ICA de Oregón

Parámetro	Condición	Función de subíndice
Temperatura	Si: $T \leq 11^\circ\text{C}$	$SI_T = 100$
	Si: $11^\circ\text{C} < T \leq 29^\circ\text{C}$	$SI_T = 76.54007 + 4.172431(T) - 0.1623171(T)^2 - 2.055666 * 10^{-3}(T)^3$
	Si: $29^\circ\text{C} < T$	$SI_T = 10$
Oxígeno disuelto	Si: $(OD) \leq 3.3 \text{ mg/l}$	$SI_{OD} = 10$
	Si: $3,3 \text{ mg/l} < OD < 10.5 \text{ mg/l}$	$SI_{OD} = -80,28954 + 31,88294(OD) - 1,400999(OD)^2$
	Si: $10.5 \text{ mg/l} \leq OD$	$SI_{OD} = 100$
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Si: $DBO \leq 8 \text{ mg/l}$	$SI_{DBO} = 100 * (e)^{[DBO * (-0.199314)]}$
	Si: $8 \text{ mg/l} < DBO$	$SI_{DBO} = 100$
Potencial de hidrógeno	Si: $\text{pH} < 4$	$SI_{\text{pH}} = 10$
	Si: $4 \leq \text{pH} < 7$	$SI_{\text{pH}} = 2.628419 * (e)^{[\text{pH} * (0.520025)]}$
	Si: $7 \leq \text{pH} = 8$	$SI_{\text{pH}} = 100$
	Si: $8 < \text{pH} = 11$	$SI_{\text{pH}} = 100 * (e)^{[(\text{pH}-8) * (-0.520025)]}$
	Si: $11 < \text{pH}$	$SI_{\text{pH}} = 10$
Nitrógeno Total	Si: $N \leq 3 \text{ mg/l}$	$SI_N = 100 * (e)^{[N * (-0.460512)]}$
	Si: $3 \text{ mg/L} < N$	$SI_N = 10$
Fósforo Total	Si: $P \leq 0.25 \text{ mg/l}$	$SI_P = 100 - 299.5406 * (P) - 0.1384108 * (P)^2$
	Si: $0.25 \text{ mg/l} < P$	$SI_P = 10$
Sólidos Totales	Si: $TS \leq 40 \text{ mg/l}$	$SI_{ST} = 100$
	Si: $40 \text{ mg/l} < ST = 280 \text{ mg/l}$	$SI_{ST} = 123.4356 * (e)^{[ST * (-5.29647 * 10^{-3})]}$
	Si: $280 \text{ mg/L} < TS$	$SI_{ST} = 10$
Coliformes Fecales	Si: $CF \leq 50 \text{ NMP} / 100 \text{ ml}$	$SI_{CF} = 98$
	Si: $50 \text{ NMP} / 100 \text{ ml} \leq CF \leq 1600 \text{ NPM} / 100 \text{ ml}$	$SI_{CF} = 98 * (e)^{[(CF-50) * (-9.917754 * 10^{-4})]}$
	Si: $1600 \text{ NPM} / 100 \text{ ml} < CF$	$SI_{CF} = 10$

Fuente: (Uddin et al., 2021)

Elaboración: Autor 2022

Tabla 12: Interpretación del WQI

Índice de calidad (WQI)	Clasificación
(90-100)	Excelente
(85-89)	Bueno
(80-84)	Regular
(60-79)	Pobre
(<60)	Muy pobre

Fuente: (Uddin et al., 2021)

Elaboración: Autor 2022

3.3.4 Metodología para determinar la calidad del agua mediante el Índice Canadiense (CCME)

Este índice se desarrolló a partir del modelo WQI de Colombia Británica (BCWQI) en 2001, se considera uno de los índices más usados debido a su fácil aplicación y su proporción de factibilidad al momento de seleccionar los parámetros de calidad del agua ya que la selección dependerá de acuerdo con el usuario y la disponibilidad de los datos (Singh & Saxena, 2018). Para la selección de parámetros se tomaron en cuenta los que están dentro de la normativa nacional, cabe recalcar que este índice se diferencia del resto debido a que no se incluye un componente de cálculos de subíndices y ponderaciones para los parámetros (Uddin et al., 2021). Por otra parte, para el cálculo de agregación es bastante diferente a los demás, el cual se presenta en la *tabla 13*:

Tabla 13: Fórmulas para el cálculo de agregación del índice CCME

$WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}$	
Donde:	
F ₁ = Alcance (porcentaje del total de parámetros que no cumplen con los objetivos especificados)	
F ₂ = Frecuencia (porcentaje de valores de las pruebas individuales que no cumplen con los valores de los objetivos, pruebas fallidas)	
F ₃ = Amplitud (medida de la cantidad en la que los valores de prueba no logran sus objetivos)	
Alcance	Frecuencia
$F_1 = \frac{\text{Número de parámetros fallidos}}{\text{Número total de parámetros}} * 100$	$F_2 = \frac{\text{Número de ensayos fallidos}}{\text{Número total de mediciones}} * 100$
Amplitud	
$F_3 = \frac{nse}{0.01(nse) + 0.01}$	$Excursión_i = \frac{\text{Valor fallido}}{\text{Objetivo de calidad}} - 1$ Cuando el valor no debe exceder el objetivo
$nse = \frac{\sum_{i=1}^n excursión}{\text{número total de ensayos}}$	$Excursión_i = \frac{\text{Objetivo de calidad}}{\text{Valor fallido}} - 1$ Cuando el valor no debe ser menor del objetivo

Fuente: (Uddin et al., 2021)

Elaboración: Autor 2022

La clasificación se realiza según el resultado del ICA, el cual se interpreta de manera general como se muestra en la *tabla 14*.

Tabla 14: Interpretación del WQI

Índice de calidad (WQI)	Clasificación
(95-100)	Excelente
(80-94)	Bueno
(65-79)	Regular
(45-64)	Marginal
(0-44)	Pobre

Fuente: (Uddin et al., 2021)

Elaboración: Autor 2022

3.4 Identificación de los parámetros para la creación del propio índice del río Tomebamba

3.4.1 Comprobación de la normalidad de los datos

Para el cálculo de la normalidad de los datos, se utilizó el complemento Real Statistics del software Excel, el cual da como resultado una descripción estadística y normalidad de los datos. En el complemento se ingresó los valores promedio de los parámetros medidos por año y por estación que se quiso comprobar; tal es el caso que, se determinó la normalidad o no de acuerdo con la división de las estaciones de monitoreo (parte alta, media y baja). La normalidad o no de los datos fue comprobada mediante las pruebas paramétricas de Shapiro – Wilk Test y el diagnóstico de Agostino – Pearson; en ambos casos se aceptó la normalidad si el valor de p-value es mayor a α (alfa, nivel de significancia) de 0.05.

3.4.2 Análisis de correlación

Para el análisis de correlación de los datos, se utilizó el complemento “Análisis de datos” del software Excel y el comando coeficiente correlación. La herramienta de análisis de correlación es especialmente útil cuando existen más de dos variables de medida para cada uno de los N sujetos (Sosa, 2016). Para este caso, se ingresaron todas las variables que se analizaron para el presente estudio considerando todos los parámetros de la base de datos. Se consideró lo siguiente: si los datos siguen una distribución normal se aplicó coeficiente de correlación de Pearson y en el caso de la no normalidad se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman. Como resultado se proporcionó una matriz de correlación que muestra el valor de coeficiente de correlación aplicado a cada uno de los pares de variables de medida posibles.

El valor de la correlación puede ser negativo o positivo de acuerdo con su signo, estos valores de correlación se interpretaron en base a tres categorías.

- Correlación fuertemente positiva +1
- Correlación débil 0
- Correlación fuertemente negativa -1

Para el presente trabajo se seleccionó aquellos parámetros que presentaron una correlación fuertemente positiva o negativa de acuerdo al análisis para la selección de los parámetros.

3.5 Desarrollo del índice propio basado en un proceso de jerarquía analítica

Para el desarrollo del índice propio se tomó en cuenta tres pasos importantes: el paso 1 correspondió a la definición de los objetivos, el paso 2 fue seleccionar los parámetros que se incluyeron en el ICA y el paso 3 implicó formular la expresión matemática para calcular el valor del ICA. Dentro del paso 3 se consideró la identificación de los pesos de los parámetros seleccionados.

En este trabajo, se aplicó el proceso de jerarquía analítica (AHP) para determinar los pesos (ponderaciones) de cada uno de los parámetros escogidos para desarrollar el índice propio de calidad del agua (ICA) del río Tomebamba.

3.5.1 Identificación de los pesos para cada parámetro seleccionado

En términos conceptuales el procedimiento para establecer los pesos mediante la metodología de AHP consideró varios pasos: 1. Estructurar una jerarquía; 2. Construir la matriz de comparaciones por pares; 3. Cálculo de los pesos (vector propio de prioridad); 4. Evaluación de la coherencia; 5. Agregación de pesos individuales a grupales (Inamdar P., 2014). En la *figura 2* se observan los pasos utilizados del AHP en forma de diagrama de flujo para determinar los pesos de cada parámetro.

3.5.1.1 Estructura de una Jerarquía

La estructuración de la jerarquía se estableció definiendo un objetivo general en el primer nivel, a este le siguen los objetivos específicos que se necesitan para lograr el objetivo general en el nivel inferior. Para el presente trabajo, el objetivo general fue establecer los pesos de los parámetros de calidad del agua (nivel superior) y como objetivos específicos los parámetros de calidad del agua seleccionados (nivel inferior). La selección de los parámetros que conforman el nivel inferior se seleccionó en base al análisis de correlación como se detalló en la sección 3.4.

3.5.1.2 Matriz de comparaciones por pares

Para este estudio, las comparaciones por pares mediante una matriz de los parámetros de calidad del agua fue un paso sumamente fundamental en la aplicación de la metodología del AHP (*Figura*

7) (Sutadian et al., 2017). En tal sentido se construyó una matriz de comparación por pares, mismo que sirvieron para que los responsables de la toma de decisiones (encuestados) puedan valorar la importancia relativa de un parámetro respecto al otro, en una escala de 1 a 9 puntos (Saaty, 2012). Se aplicaron las matrices con la finalidad de transformar los resultados de los encuestados en valores cuantitativos de las comparaciones por pares. En la *tabla 15* se detalla la interpretación de la escala de 1 a 9 puntos de acuerdo con la importancia relativa.

Tabla 15: Escala de 1 a 9 puntos utilizada para el AHP

Importancia relativa	Escala	Importancia relativa	Escala
Igualmente, importante	1	Igualmente, importante	1
Moderadamente importante	3	Moderadamente menos importante	1/3
Fuertemente importante	5	Débilmente importante	1/5
Muy importante	7	Muy débilmente importante	1/7
Extremadamente importante	9	Extremadamente débil	1/9
Valores intermedios	2, 4, 6, 8	Valores recíprocos intermedios	1/2, 1/4, 1/6, 1/8

Fuente: (Saaty, 1987)

Elaboración: Autor 2022

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & \dots & a_{2N} \\ a_{31} & \dots & a_{22} & \dots & a_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix}$$

Figura 7: Esquema de una matriz de comparación por pares para el AHP

Fuente: (Sutadian et al., 2017)

De acuerdo con la escala de 1 a 9 puntos (*tabla 15*), un valor de 1 denota que tanto el parámetro i como el parámetro j son igualmente preferidos y un valor de 9 indica que el parámetro i es extremadamente importante respecto al parámetro j . Si un parámetro se prefiere en menor importancia al otro, los valores recíprocos de la escala (columna 2, *tabla 15*) se emplean para representar la intensidad de menor preferencia. Es así como, cada valoración de los encuestados se registró en la matriz de $N \times N$ dimensiones, donde N es el número de parámetros a comparar (*Figura 7*). Cabe recalcar que los encuestados únicamente llenaron la parte superior de la matriz (triángulo superior), ya que la parte inferior (triángulo inferior) es el recíproco positivo de la parte superior, la diagonal de la matriz recibe un valor de 1 en vista que se compara el mismo parámetro.

En la *figura 8* se observa la matriz con los parámetros seleccionados, siendo la parte amarilla la que llenaron los encuestados.

Parámetros	Coliformes Fecales	Color aparente	Dureza	DBO	Turbiedad	% Oxígeno disuelto	Solidos Total	Nitratos	pH	Temperatura
Coliformes Fecales	1									
Color aparente		1								
Dureza			1							
DBO				1						
Turbiedad					1					
% Oxígeno disuelto						1				
Solidos Total							1			
Nitratos								1		
pH									1	
Temperatura										1

Figura 8: Matriz de comparación por pares

Así mismo, para conocer el número total de comparaciones, es decir el número de matrices, se determinó aplicando la siguiente fórmula:

$$J = \frac{N(N - 1)}{N} \quad (7)$$

Donde J representa las comparaciones y N la cantidad de parámetros seleccionados.

3.5.1.3 Cálculo de los pesos

Una vez obtenidas las matrices de comparación por pares de los parámetros, la estimación de pesos se obtuvo aplicando el álgebra matricial, para así calcular el vector propio principal de cada matriz. En términos matemáticos el vector propio principal de cada matriz una vez normalizados se convierte en vector de prioridades, es decir los pesos de cada parámetro para dicha matriz.

Según Inamdar. (2014) el procedimiento más sencillo para estimar los valores aproximados del vector propio principal de cada matriz (pesos) es dividir el valor de cada columna para la suma total de dicha columna, este procedimiento normaliza los valores de dicha columna por ende la suma de los valores normalizados tiene que ser la unidad, en tal sentido el promedio de cada fila de los valores normalizados proporciona el valor aproximado del vector propio principal (pesos).

Para el presente estudio se optó por el uso de un software matemático comercial Expert Choice de AHP, mismo que determina el vector propio principal de cada matriz, el procedimiento consta en elevar al cuadrado cada matriz de comparación por pares de manera iterativa y luego suma los valores de la fila y normaliza los mismos hasta que la diferencia entre dos cálculos sea muy pequeña (Saaty, 1987).

3.5.1.4 Evaluación de la coherencia

Evaluar la coherencia no forma parte de la obtención de los pesos de los parámetros, sin embargo, aporta una comprobación de manera lógica la validez de los resultados obtenidos de los encuestados mediante las matrices de comparación por pares. En tal sentido el AHP toma en cuenta la evaluación de la coherencia, en vista de que en la práctica es difícil alcanzar un juicio 100 % coherente, con esto se garantiza que las comparaciones por pares estén dentro de un rango de coherencia aceptable (Inamdar, 2014; Saaty, 1987; Sutadian et al., 2017).

Como primer paso de la evaluación de coherencia de una matriz, fue multiplicar la matriz original que fue llenada por el encuestado y completada con sus recíprocos por el vector propio principal (es decir por los pesos) como se describe a continuación.

$$Aw = (\text{Matriz original llenada por el encuestado}) * (\text{vector propio original}) \quad (8)$$

Donde:

- A = matriz original llenada por el encuestado
- w = vector propio original (pesos)

Como resultado de la multiplicación se obtuvo un nuevo vector. Posteriormente cada componente del vector resultado de la multiplicación de Aw se dividió de nuevo para cada valor del vector propio principal (w), para obtener un nuevo vector denominado Av.

Luego se calculó el valor de λ_{max} (mayor valor propio) mismo que viene a ser el promedio de los valores del vector Av, el mayor valor propio se utilizó para calcular el índice de coherencia o coeficiente de incoherencia (C.I.) aplicando la siguiente ecuación (9).

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1} \quad (9)$$

Donde:

- λ_{max} = mayor valor propio
- N = número total de parámetros seleccionados
- C.I. = índice de coherencia o coeficiente de incoherencia

Como último paso en la determinación de la coherencia fue comparar el C.I. con el índice de consistencia aleatorio (R.I.) mismo que fue propuesto por (Saaty, 1987), básicamente el R.I. representa un promedio de C.I. de diferentes tamaños de matrices generadas aleatoriamente, en la *tabla 16* se puede observar los valores de R.I.

La relación entre C.I. y R.I. se conoce como relación de coherencia (C.R.) y se calcula aplicando la siguiente fórmula (10):

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (10)$$

En base a todo lo anterior y una vez obtenido el C.R se dice que si el valor de C.R. es inferior a 0.10 entonces se puede determinar que las respuestas de los encuestados tienen una relación de coherencia totalmente aceptable, caso contrario si el valor es mayor a 0.10 dicha encuesta no se procesó como parte del análisis. Para el estudio el cálculo de la coherencia se determinó utilizando el software Expert Choice de AHP.

Tabla 16: Valores de índice de consistencia aleatorio (R.I.)

Valores de R.I. para diferentes tamaños de matrices													
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56

Fuente: (Saaty, 1987)
Elaboración: Autor 2022

3.5.1.5 Agregación de pesos individuales a grupales

Para este estudio al tener un solo nivel de jerarquía se optó por aplicar el método de agregación prioridades individuales (AIP) el cual consistió en obtener un conjunto de ponderaciones a partir de las respuestas de las matrices de comparaciones por pares (Sutadian et al., 2017).

Para este método se tomó en cuenta los pesos obtenidos a partir de las matrices de cada encuestado, luego estos pesos individuales se agregaron para formar los pesos de cada parámetro agrupados (Forman & Peniwati, 1998). Para el método AIP se puede aplicar el método de media aritmética o media geométrica. No obstante, para este estudio se optó por el método de media geométrica, envista que éste es más sólido con AHP en comparación con la media aritmética.

3.5.2 Generación de subíndices

La formación de subíndices consiste en transformar los parámetros de calidad del agua en una escala común, ya que los valores reales de los parámetros tienen sus distintas unidades de medición (Sarkar & Abbasi, 2006). Para la obtención de los subíndices se usó la metodología basada en estándares de calidad de agua. Este método se fundamenta en comparar el valor real medido con los límites aceptables de los parámetros escogidos para generar los valores de los subíndices (Akhtar et al., 2021), para lo cual se usó la *ecuación (11)*:

$$Si = \frac{P_c}{M_{pl}} \quad (11)$$

Donde:

- P_c = el valor medido

- M_{pl} = es el límite máximo permitido (mg/L) del parámetro de calidad del agua.

3.5.3 Agregación de los subíndices para la obtención del ICA

El proceso de agregación es el paso final del modelo de índice de calidad del agua, mismo que sirve para agregar los subíndices de los parámetros en una única puntuación del índice de calidad del agua. Para este estudio se aplicó el método aditivo de agregación de índices. En este método, los valores totales de agregación final deben dividirse por los pesos totales de los parámetros seleccionados, como se expresa mediante la siguiente *ecuación (12)* (Akhtar et al., 2021).

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * S_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (12)$$

Donde:

- ICA es el valor del índice de calidad.
- S_i es el valor de los subíndices.
- P_i son los valores de ponderación del parámetro
- n es el número de parámetros.

3.5.4 Interpretación del valor del índice

Para el índice propio del río Tomebamba se adoptó cinco rangos de clasificación para evaluar la calidad del agua, los cuales están en un rango de 0 a 100 puntos como se describe a continuación:

1. Excelente (ICA = 90 – 100)
2. Bueno (ICA = 70 – 90)
3. Medio (ICA = 50 – 70)
4. Malo (ICA = 25 – 50)
5. Muy malo (ICA= 0 – 25)

Según Sierra. (2011) para la determinación de los rangos de clasificación del ICA no existe ningún procedimiento establecido, sin embargo, los valores del ICA (rangos) pueden ser establecidos por el propio desarrollador del índice o por un especialista conocedor del tema, esto en base a sus conocimientos, experiencia y consultas bibliográficas.

3.6 Comparación del índice propio

En esta sección se compararon los resultados obtenidos del índice NSF e índice de Dinius con el índice propio basado en el proceso de jerarquía analítica (AHP) para el río Tomebamba.

3.6.1 Comparación conceptual del índice propio

Contextualmente comparó los resultados del ICA basado en un proceso de jerarquía analítica, con los resultados del índice NSF y el índice de Dinius, teniendo en cuenta los valores del ICA por cada estación y para cada año de análisis, así mismo se tuvo en cuenta las tres zonas parte alta, media y baja para la respectiva comparación.

3.6.2 Análisis de correlación del índice propio con el NSF y el índice de Dinius

Para el análisis de correlación entre los resultados con los índices NSF e índice de Dinius se utilizó el software Excel y la herramienta análisis de datos junto a la función coeficiente correlación.

El valor de la correlación puede ser negativo o positivo de acuerdo con su signo, estos valores de correlación se interpretaron en base a tres categorías como se describe en la sección 3.4.2.

3.7 Análisis para la calibración del índice propio

En base a los resultados de los valores del ICA obtenidos a partir del índice propio, se procede a la calibración del modelo mediante la aplicación de la regresión lineal múltiple, para encontrar la ecuación que mejor se ajuste al modelo.

3.7.1 Análisis de regresión lineal múltiple

Primero se realizó un análisis de correlación entre los valores del ICA del índice propio con los parámetros que se utilizaron para el cálculo del ICA, mostrando sus respectivos coeficientes y significancia. Para este caso se utilizó el coeficiente de Pearson.

Para encontrar la ecuación del ICA, se utilizó el análisis de regresión lineal múltiple, el cual se basa en la metodología de los mínimos cuadrados ordinarios mismo que ajusta una línea recta de acuerdo a la dispersión de las variables haciendo que la suma de los cuadrados residuales disminuya. Mediante este método podemos evaluar numéricamente la relación existente que tienen las variables específicas con el resultado de interés (Valentini et al., 2021).

Para el presente estudio se evaluaron los modelos utilizando los parámetros que presentaron una correlación significativa de acuerdo al análisis de correlación antes mencionado. Luego se analizaron los modelos con el fin de seleccionar el que presente mejores ajustes. Todos estos análisis se realizaron utilizando el software de análisis estadístico SPSS.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Calidad del agua del río Tomebamba mediante índices de calidad del agua (ICAs) ya existentes

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la aplicación de los 4 índices de calidad del agua más comúnmente usados a nivel mundial (índice NSF, índice de Dinius, índice de Oregón y el índice CCME). Los cuatro índices fueron determinados para cada una de las estaciones de monitoreo del río Tomebamba.

4.1.1 Análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos utilizados para el cálculo de los ICA_s

De acuerdo a la base de datos proporcionada por la empresa ETAPA EP, en las *tablas 17 – 19* se presentan los parámetros que fueron utilizados para el cálculo de los 4 índices. Así mismo, se incluye la comparación con la normativa, límites máximos permisibles del TULSMA, Libro VI, anexo 1, considerando específicamente la tabla 1 (*ver anexo 1*) límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional. Se consideró este criterio en vista de que, el río Tomebamba es fuente de abastecimiento de agua para la planta de tratamiento de agua potable el Cebollar.

Es importante mencionar que las *tablas 17 – 19* corresponden a cada estación de monitoreo; los valores de los parámetros fueron considerados por año, desde el 2012 hasta el 2019 (8 años en cada estación). Las estaciones fueron agrupadas en tres zonas, parte alta, parte media y parte baja, es así que, como ejemplos la *tabla 17* corresponde a una estación de la parte alta, la *tabla 18* de la parte media y la *tabla 19* de la parte baja. En el *anexo 3* se presentan los parámetros de las estaciones faltantes.

Tabla 17: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte alta

Estación: TOM – QN – 025															
Parte Alta															
Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT-PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
2012	101	44.533	8.11	0.366	10.3	0.09193	0.0866	3.18	86	44.6	26.33	96.76	40.8	53.58	0.03
2013	98.35	124.975	8.0825	0.245	10.775	0.008685	0.00538	0.7365	74.75	1003.7	24.25	65.6	41.1625	44.705	0.00283
2014	104.66	73.33	7.843	0.393	9.1	0.02169	0.013706	0.883	73.66	336.66	27	80.7	46.11	50.383	0.00708
2015	101.2	799	7.743	0.25	10.833	0.03553	0.01077	1.133	67.66	5456.6	21.33	92.2	40.423	41.45	0.01159
2016	100	10.75	7.735	0.3	11.8	0.08974	0.08796	0.9	84.5	180	25	132.3	58.42	49.725	0.02928
2017	100	12.4	7.455	0.35	11.25	0.016235	0.017915	1.405	66.5	76.5	29	89.3	37.955	34.825	0.0053
2018	101	15.4	7.63	0.575	11.45	0.01621	0.03925	1.5	77.5	124.5	14	119.6	36.185	50.785	0.00529
2019	100.5	13.9	7.542	0.4625	11.35	0.01622	0.0285	1.4525	72	100.5	21.5	104.45	37.07	42.805	0.00529
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2013	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2014	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2018	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2019	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-

Elaboración: Autor 2022

Tabla 18: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte media

Estación: TOM – LL – CONTROL															
Parte Media															
Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT- PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
2012	104	84	7.983	0.76	12.13	0.02395	0.024933	1.5366	70	383.33	23	51.94	55.07	47.196	0.00940
2013	97.5	53.5	8.24	0.8	12.65	0.20936	0.023677	1.7025	84.25	257.5	33.25	112.1	50.252	52.255	0.06715
2014	101.66	163.33	7.7	0.433	12.166	0.01977	0.02788	0.77	70.66	240	14.66	106.9	50.23	53.61	0.00804
2015	99.4	189.5	7.685	0.5	14.05	0.04685	0.015635	0.795	70.5	280	14.5	110.5	42.97	59.555	0.01361
2016	99.55	280	7.625	0.35	12.55	0.01944	0.03153	0.977	77.5	1005	44.5	114.95	69.24	55.925	0.01152
2017	98.5	59.5	7.8	0.475	14	0.03715	0.03938	1.47	68.5	71.5	33.5	77.9	46.18	43.775	0.01197
2018	99.5	89.5	7.67	0.525	12.95	0.04935	0.039185	1.81	78	735	20.5	117.3	46	49.645	0.01083
2019	101.5	1756	7.905	0.4	12.65	0.03597	0.040375	1.2	69	1789.5	23.5	97.1	51	52.245	0.01027
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2013	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2014	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2018	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2019	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-

Elaboración 2022

Tabla 19: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte baja

Estación: TOM – TOM – 030															
Parte Baja															
Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT-PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
2012	110.75	124500	8.1975	1.625	11.525	0.191525	0.1475	3.4025	142.5	152250	30	78.12	47.01	46.3375	0.0625
2013	98.75	159750	7.77625	1.2625	12.25	0.130235	0.14	3.055	85.75	247250	44.5	97.525	45	40.8675	0.0425
2014	100	25633.3	7.7	0.66	11.533	0.204297	0.08	1.84	83.33	67666.6	17.6	102.36	56.32	55.41	0.0666
2015	99.233	31000	7.1667	0.8333	12.033	0.19408	0.13	7.6333	89	40000	166	82.3	36	35.325	0.0633
2016	98.333	19000	7.5967	0.61	12.466	0.18387	0.1933	4.36	85.3	19000	52.6	108.3	32.66	44.655	0.06
2017	98.333	43000	7.72	0.9	12.866	0.2962	0.2433	2.7	94	56000	34	95.5	45.325	43.23	0.096
2018	99.667	29666.67	7.603	1.425	11.733	0.3166	0.1633	3.39	77	65000	56.3	90.66	39	38.925	0.1033
2019	100	31666.67	7.623	1.09167	11.8	0.4086	0.5963	17.31	87.67	32000	146	76	49.05	44.325	0.1333
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2013	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2014	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2018	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2019	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-

Elaboración: Autor 2022

De acuerdo con la comparación con la Normativa, en la parte alta misma que corresponde a 3 estaciones de monitoreo, en la estación TOM – QN – 025 (ver tabla 17) los coliformes fecales fueron el único parámetro que no cumplieron con la normativa en el año 2015. Mientras que, en las estaciones TOM – QN – 015 y TOM – QN – 005 los parámetros que no cumplieron fueron los coliformes fecales y coliformes totales: en la estación TOM -QN – 015 ambos parámetros no cumplieron en el año 2012 y únicamente los coliformes totales no cumplieron en el año 2019 respectivamente. Mientras que, en la estación TOM -QN – 005 ambos parámetros no cumplieron en el año 2012 (ver anexo 3).

Respecto a la parte media (tres estaciones), los coliformes fecales y coliformes totales son los parámetros que no cumplieron la normativa, para la estación TOM – LL – CONTROL los coliformes fecales no cumplieron en el año 2019 (ver tabla 18); en la estación TOM – TOM – 005, los coliformes fecales no cumplieron en los años 2012 y 2015, los coliformes totales no cumplieron en los años 2012, 2015 y 2019; mientras que, en la estación TOM – CU – CONTROL los coliformes fecales no cumplieron en todos los años de estudio y los coliformes totales únicamente cumplieron la normativa en el año 2019 (ver anexo 3).

Por último para la parte baja correspondiente a 4 estaciones, para la estación TOM – TOM – 030 los coliformes fecales y totales no cumplieron con la normativa en todos los años de estudio a estos se suma el color que no cumplieron en los años 2015 y 2019 (ver tabla 19); en la estación TOM – TOM – 050 los coliformes fecales y totales no cumplieron con la normativa en todos los años de estudio, la DBO₅ no cumplió en los años 2012, 2013 y 2017, mientras que el color no cumplió en el 2017 y 2019; en las estaciones TOM – MIL CONTROL y TOM – TOM – CONTROL los coliformes fecales, totales, DBO₅ y color no se cumplió en todos los años analizados; se determinó también que en la estación TOM – MIL – CONTROL el porcentaje de oxígeno disuelto no se cumplió en el 2012, 2013, 2014, 2018 y 2019 (ver anexo 3).

De acuerdo al análisis anterior se puede observar que en las estaciones de la parte baja la mayor cantidad de parámetros sobrepasan los límites establecidos, en base a este análisis se puede decir que, los parámetros que no cumplieron con la normativa en las estaciones de la parte baja se debe a que dichas estaciones se encuentran ubicadas a lo largo del río que atraviesa la parte urbana de la ciudad, por ende la concentración de contaminantes es mayor en comparación a las estaciones de la parte alta, las cuales se encuentran ubicadas en la parte rural donde la población es escasa y gran parte se encuentra en el área protegida del Parque Nacional Cajas.

4.1.2 Calidad del agua del río Tomebamba mediante el índice NSF

Una vez aplicado el índice NSF para el cálculo de la calidad del agua del río Tomebamba, se obtuvo los resultados para cada estación de monitoreo y en los respectivos años de análisis, los

resultados se muestran en las *tablas 20 a la 22*. En la *figura 9* se presenta los ICA de todas las estaciones para todos los años analizados de manera general.

En la *tabla 20* se presenta los índices NSF de las estaciones ubicadas en la parte alta (tres estaciones). De acuerdo con la clasificación de la calidad del agua, se determinó que en las tres estaciones y para los 8 años de estudio la calidad se categorizó como BUENA con un valor de ICA de 77 como mínimo y máximo de 88. Así mismo, en la estación TOM – QN – 025 que está ubicada cerca del nacimiento del río Tomebamba los valores del ICA se encuentran por encima del valor de 80, es decir no hay mucha contaminación del recurso en dicha zona. Adicional a esto, la longitud del río Tomebamba que cubren las estaciones de la parte alta se encuentran dentro del Parque Nacional Cajas, la cual es un área protegida. En la estación TOM – QN – 005 se determinó la calidad para 7 años (2013 – 2019) en vista que no se contaba con datos suficientes para el cálculo del año 2012, este análisis de los 7 años se aplicó para los 4 índices.

Tabla 20: Resultados del ICA – NSF para las estaciones de la parte alta

Estaciones de la parte Alta			
Estación	TOM – QN – 025	TOM – QN – 015	TOM – QN – 005
Año	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF
2012	82	76	-
2013	82	82	82
2014	82	79	79
2015	80	81	77
2016	88	80	84
2017	87	82	83
2018	87	82	84
2019	84	81	81
Año	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad
2012	Buena	Buena	-
2013	Buena	Buena	Buena
2014	Buena	Buena	Buena
2015	Buena	Buena	Buena
2016	Buena	Buena	Buena
2017	Buena	Buena	Buena
2018	Buena	Buena	Buena
2019	Buena	Buena	Buena

Elaboración: Autor 2022

En la *tabla 21* se presenta los índices NSF de las estaciones ubicadas en la parte media. Al igual que en la parte alta y de acuerdo con los valores del ICA obtenidos, la calidad se clasifica como de buena calidad en las tres estaciones y en los 8 años de estudio, con un valor del ICA de 72 como mínimo y 85 como máximo. No obstante, a pesar de que la calidad del agua es buena, los valores del ICA son un poco menores en comparación con los valores obtenidos en las tres estaciones de la parte alta, esto se asume ya que, la longitud del río que cubren estas estaciones está ubicadas en la parte urbana de la parroquia Sayausí y según Segarra, (2016) la población

tienen minifundios (1 – 3 ha) y latifundios (más de 100 ha) que son destinados a la producción hortícola y la ganadería especializada en la producción de leche a esto se suma la descarga de aguas residuales de los centros poblados aledaños al río, por ende la contaminación del recurso hídrico aumenta.

Tabla 21: Resultados del ICA – NSF para las estaciones de la parte media

Estaciones de la parte Media			
Estación	TOM – LL – CONTROL	TOM – TOM – 005	TOM – CU – CONTROL
Año	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF
2012	83	78	75
2013	82	78	77
2014	83	80	78
2015	84	79	80
2016	82	83	75
2017	85	84	78
2018	84	83	72
2019	79	84	78
Año	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad
2012	Buena	Buena	Buena
2013	Buena	Buena	Buena
2014	Buena	Buena	Buena
2015	Buena	Buena	Buena
2016	Buena	Buena	Buena
2017	Buena	Buena	Buena
2018	Buena	Buena	Buena
2019	Buena	Buena	Buena

Elaboración: Autor 2022

La tabla 22 corresponde a los resultados de la calidad del agua del río Tomebamba de las estaciones de la parte baja. La calidad del agua en la estación TOM – TOM – 030 en los 8 años de estudio se categorizó como buena, presentando valores del ICA como mínimo de 72 y máximo de 77, a pesar de que la calidad del agua es buena los valores del ICA son mucho menores en comparación a las estaciones de la parte alta y media. Para la estación TOM – TOM – 050, la calidad del agua se clasificó en dos categorías, medio para los años 2012, 2017 y 2019 y buena para los años 2013, 2014, 2015, 2016 y 2018. La calidad del agua en la estación TOM – MIL – CONTROL en todos los años fue mala con valores del ICA menores a 56, se considera que en dicha estación la calidad fue mala, en vista de que, justo en este punto desemboca las aguas de la quebrada Milchichig, la cual atraviesa la parte urbana de la ciudad de Cuenca arrastrando en sus aguas contaminación de la urbe producto del arrastre de las aguas pluviales, generando un aumento en la concentración de contaminantes para el río Tomebamba. En la estación TOM – TOM – CONTROL la calidad del agua se clasificó de calidad media para todos los años.

En base a los resultados obtenidos a partir del índice NSF, se puede notar que en las estaciones de la parte baja los valores del ICA son mucho menores en comparación a los de la parte alta y media, esto se debe a que estas estaciones se encuentran distribuidas a lo largo del río que cubre toda la parte urbana de la ciudad.

Tabla 22: Resultados del ICA – NSF para las estaciones de la parte baja

Estaciones de la parte Alta				
Estación	TOM – TOM – 030	TOM – TOM – 050	TOM – MIL – CONTROL	TOM – TOM – CONTROL
Año	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF
2012	72	67	47	60
2013	75	71	53	68
2014	76	74	52	67
2015	75	76	55	68
2016	77	76	56	66
2017	76	64	56	66
2018	76	73	56	69
2019	72	69	46	66
Año	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad
2012	Buena	Medio	Mala	Medio
2013	Buena	Buena	Mala	Medio
2014	Buena	Buena	Mala	Medio
2015	Buena	Buena	Mala	Medio
2016	Buena	Buena	Mala	Medio
2017	Buena	Medio	Mala	Medio
2018	Buena	Buena	Mala	Medio
2019	Buena	Medio	Mala	Medio

Elaboración: Autor 2022

En la *figura 9* se representa de manera general la variación de la calidad del agua para el río Tomebamba a lo largo de los 8 años de análisis y las 10 estaciones de monitoreo, como se mencionó anteriormente los valores de las estaciones de la parte alta y media se encuentran en rangos muy similares, mientras que las estaciones de la parte bajan los valores del ICA soy muy pequeños por lo que la calidad del agua no es tan buena.

La única estación que presentó valores del ICA muy bajos fue la TOM – MIL – CONTROL ocasionando que la calidad del agua sea muy mala. De acuerdo con la *figura 9*, en el año 2019 el valor del ICA fue 46, seguido por el año 2012 con valor de ICA de 47 y los otros años se encontraron con valores por encima de los 50. En el *anexo 4* se puede observar cómo fue variando la calidad del agua del río Tomebamba para cada estación de monitoreo y durante los 8 años analizados.

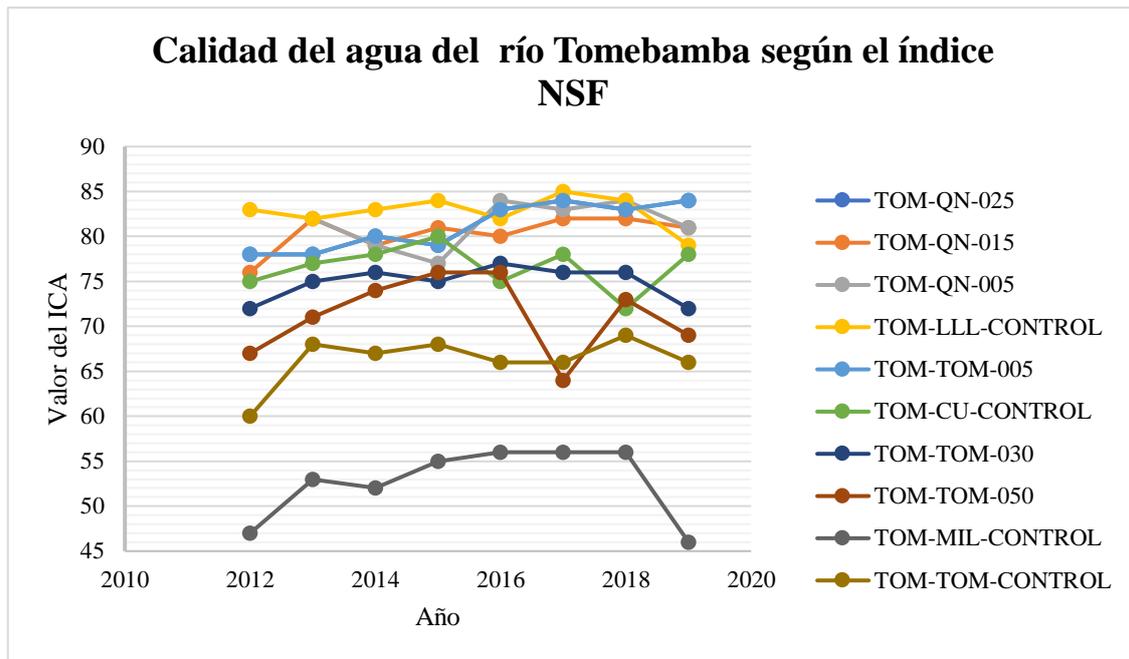


Figura 9: Calidad del agua del río Tomebamba según el índice NSF

4.1.3 Calidad del agua mediante el índice de Dinius

Luego de realizar los cálculos necesarios para determinar la calidad del agua del río Tomebamba aplicando el índice de Dinius, se presenta en las *tablas 23 a la 25* los resultados del ICA para cada estación de monitoreo y su respectiva clasificación de acuerdo con el tipo de uso, para este caso se tomó en cuenta el criterio general y para consumo humano (Pesántez & Roldán, 2021).

La *tabla 23* muestra los resultados del ICA Dinius del río Tomebamba en las estaciones de la parte alta. En la estación TOM – QN – 025 de acuerdo con el criterio general, el tipo de agua es aceptable en todos los años analizados, mientras que de acuerdo criterio de consumo humano se clasifica en dos tipos (consumo riesgoso sin purificación y requiere una purificación menor). Así mismo los valores del ICA son muy altos teniendo como mínimo 88.57 y máximo de 96.86.

Por otra parte, las estaciones TOM – QN – 015 y TOM – QN – 005 en base al criterio general presentaron una calidad de agua contaminada para los años 2012 y 2015, de acuerdo al criterio de consumo humano en esos años se necesitó de un tratamiento de agua, previo al consumo humano. Los resultados obtenidos en la parte alta y al igual que los resultados del índice de NSF, la primera estación presentó los valores más altos del ICA y las mejores condiciones de acuerdo con los criterios de clasificación de calidad del agua.

Los resultados de la calidad del agua correspondiente a la parte media se presentan en la *tabla 25*. De acuerdo con el criterio general las estaciones TOM – TOM – 005 y TOM – CU – CONTROL presentaron condiciones de contaminación en más de dos años con valores del ICA por debajo de los 78. Mientras que en la estación TOM – LL – CONTROL los resultados se asemejaron a los

de la estación TOM – QN – 025 de la parte alta (*ver tabla 23*). En base a estos resultados la calidad del agua aplicando el índice de Dinius y de acuerdo con el criterio general en las estaciones de la parte alta y media los resultados son muy similares. Sin embargo, de acuerdo con el criterio de consumo humano existe una gran variación en estas estaciones; esto en vista que para el consumo humano la calidad del agua es muy estricta y los rangos de categorización son menores en comparación a los rangos del criterio general.

Los resultados del ICA Dinius de las estaciones de la parte baja se muestran en la *tabla 25*. En todos los años analizados, la calidad del agua en la TOM – TOM – 030 de acuerdo con ambos criterios tuvo una categoría de agua contaminada, requiriendo de un tratamiento necesariamente previo al consumo humano (67.59 – 74.56). La calidad del agua en la estación TOM – TOM – 050 en el año 2017 presentó un valor del ICA muy bajo de 59.83, de acuerdo con el criterio general está altamente contaminado y riesgoso para consumo humano, el resto de los años respecto al criterio general el agua estuvo contaminada requiriendo de un tratamiento para consumo humano. La calidad del agua en la estación TOM – MIL – CONTROL es la única estación que de acuerdo con el criterio de consumo humano está caracterizada como inaceptable y por ende altamente contaminado; así mismo, los valores del ICA Dinius son muy bajos al igual que los resultados del índice NSF. La calidad del agua en la estación TOM – TOM – CONTROL presentó valores del ICA mayores a 57 y en casi todos los años a excepción del 2012 el agua necesitó de un tratamiento para consumo humano.

La *figura 10* muestra la representación gráfica de la calidad del agua del río Tomebamba aplicado el índice de Dinius, en esta figura se presentan todas las estaciones que se analizó en los 8 años de monitoreo. Al igual que en el caso anterior las estaciones de la parte alta son las que presentaron valores del ICA más altos, mientras que la estación TOM – MIL – CONTROL de la parte baja es la que presentó valores menores. Los resultados del índice NSF e índice de Dinius para la misma estación fueron similares. No obstante, de acuerdo con la figura en la estación TOM – CU – CONTROL la variación del ICA es muy notoria, para el año 2015 la calidad del agua fue en aumento, mientras que en el 2016 se dio un declive muy notorio, para el 2017 la calidad aumentó hasta mantener los valores del 2012 hasta 2014. En el *anexo 5* se puede visualizar cómo cambia el índice de calidad del agua durante los 8 años y para cada estación de monitoreo analizada.

Tabla 23: Resultados de la calidad del agua – índice de Dinius para las estaciones de la parte alta

Estaciones de la parte Alta						
Estación	TOM – QN – 025		TOM – QN – 015		TOM – QN – 005	
Año	ICA – DINIUS		ICA – DINIUS		ICA – DINIUS	
2012	89.50		78.65		-	
2013	93.87		85.37		81.92	
2014	91.31		83.92		82.21	
2015	88.57		81.38		76.79	
2016	91.20		80.48		85.70	
2017	96.86		80.48		88.02	
2018	93.73		81.14		84.42	
2019	88.81		83.06		82.74	
Año	Criterio consumo humano	Criterio general	Criterio consumo humano	Criterio general	Criterio consumo humano	Criterio general
2012	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado	-	-
2013	Se requiere una purificación menor	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable
2014	Se requiere una purificación menor	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable
2015	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2016	Se requiere una purificación menor	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable
2017	Se requiere una purificación menor	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable
2018	Se requiere una purificación menor	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable
2019	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable

Tabla 24: Resultados de la calidad del agua – índice de Dinius para las estaciones de la parte media

Estaciones de la parte Media						
Estación	TOM – LL – CONTROL		TOM – TOM – 005		TOM – CU – CONTROL	
Año	ICA – DINIUS		ICA – DINIUS		ICA – DINIUS	
2012	89.72		78.91		75.55	
2013	87.20		80.38		77.10	
2014	90.77		84.53		78.88	
2015	92.72		78.27		88.47	
2016	86.38		86.81		68.43	
2017	93.04		86.94		79.52	
2018	88.94		85.13		77.75	
2019	83.75		85.35		81.39	
Año	Criterio consumo humano	Criterio general	Criterio consumo humano	Criterio general	Criterio consumo humano	Criterio general
2012	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2013	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2014	Se requiere una purificación menor	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2015	Se requiere una purificación menor	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable
2016	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2017	Se requiere una purificación menor	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2018	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2019	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable	Consumo riesgoso sin purificación	Aceptable

Tabla 25: Resultados de la calidad del agua – índice de Dinius para las estaciones de la parte baja

Estaciones de la parte Baja								
Estación	TOM – TOM – 030		TOM – TOM – 050		TOM – MIL – CONTROL		TOM – TOM – CONTROL	
Año	ICA – DINIUS		ICA – DINIUS		ICA – DINIUS		ICA – DINIUS	
2012	67.59		65.51		47.11		57.93	
2013	67.70		64.30		46.31		61.44	
2014	73.84		68.26		48.43		63.70	
2015	73.51		69.23		51.05		61.04	
2016	74.56		69.15		50.91		63.80	
2017	71.04		59.83		52.69		61.89	
2018	70.66		65.77		49.81		63.54	
2019	68.17		67.01		44.86		60.99	
Año	Criterio consumo humano	Criterio general	Criterio consumo humano	Criterio general	Criterio consumo humano	Criterio general	Criterio consumo humano	Criterio general
2012	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado	Inaceptable para el consumo	Contaminado	Poco aceptable para consumo	Altamente contaminado
2013	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Inaceptable para el consumo	Contaminado	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2014	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Inaceptable para el consumo	Contaminado	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2015	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado	Poco aceptable para consumo	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2016	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Poco aceptable para consumo	Contaminado	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2017	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Poco aceptable para consumo	Aceptable	Poco aceptable para consumo	Contaminado	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2018	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Inaceptable para el consumo	Contaminado	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado
2019	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Aceptable	Inaceptable para el consumo	Aceptable	Se requiere un tratamiento necesario	Contaminado

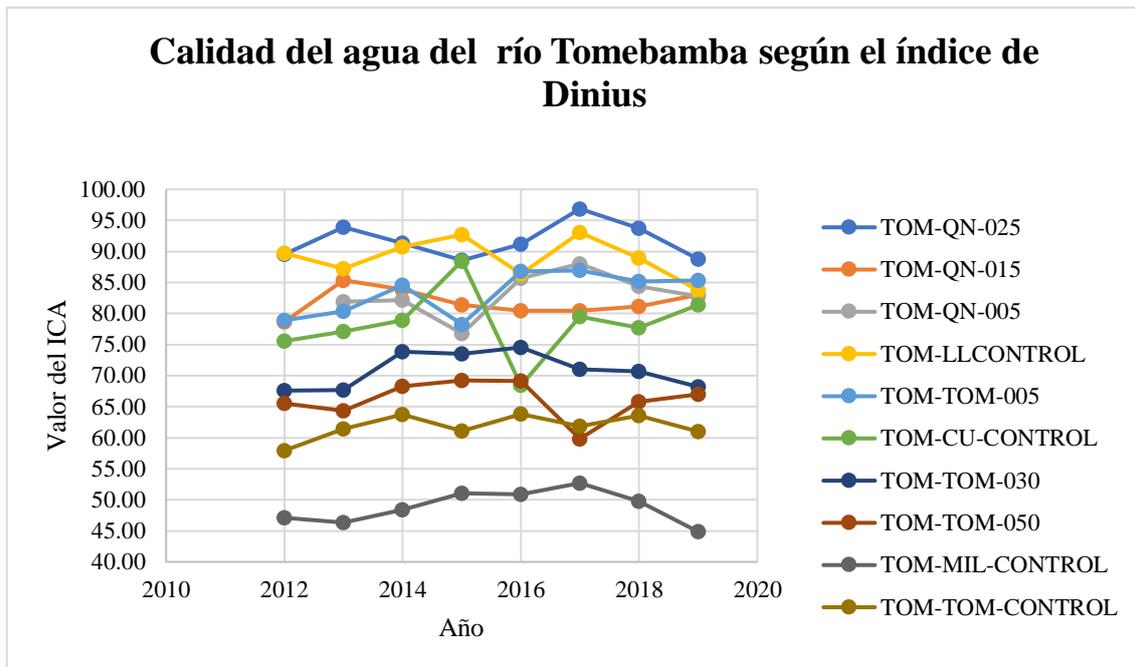


Figura 10: Calidad del agua del río Tomebamba según el índice de Dinius

4.1.4 Calidad del agua mediante el índice de Oregon

Los resultados de la aplicación del índice de calidad del agua de Oregon se resumen en las *tablas 26 a la 28*. Para cada estación se presenta el valor del ICA por año y su clasificación de calidad del agua de acuerdo al mismo.

La *tabla 26* presenta los resultados de las estaciones pertenecientes a la parte alta. Para la estación TOM – QN – 025 el valor del ICA en todos los años fue casi similar con números que oscilaron entre 90.78 a 93.50 y por ende una clasificación de calidad excelente, sin embargo, en el año 2015 el resultado descendió a 79.47 con una clasificación de calidad regular, este descenso se asume que se dio puesto que, en dicho año el parámetro coliformes fecales presentó un valor muy alto de 799 NMP/100 ml (*ver tabla 17*) superando incluso el límite máximo permisible, en base a este parámetro el valor del índice baja considerablemente, ya que, el índice de Oregon le da una importancia alta a la concentración de coliformes fecales al momento de aplicarlo en el cálculo del índice de calidad del agua.

La calidad del agua en la estación TOM – QN – 015 en el año 2012 fue muy pobre (27.09), al igual que en la estación anterior los coliformes fecales fueron el factor que hizo que dicho valor disminuya, ya que, la concentración en ese año fue muy alta, los años siguientes se mantuvo en una calidad de agua excelente (90.95 – 91.29) y buena (85.88 – 89.66) respectivamente. La estación TOM – QN – 005 en la que solo se analizaron 7 años, presenta valores muy similares a la estación anterior, en el 2015 la calidad del agua fue muy pobre (56.64) influenciado también

por altas concentraciones de coliformes fecales finalmente en los años restantes la calidad varió entre buena y excelente.

Tabla 26: Resultados del ICA - índice de Oregon en las estaciones de la parte alta

Estaciones de la parte Alta			
Estación	TOM – QN – 025	TOM – QN – 015	TOM – QN – 005
Año	ICA – OREGON	ICA – OREGON	ICA – OREGON
2012	90.78	27.09	-
2013	91.19	90.95	91.25
2014	93.50	89.66	87.43
2015	79.47	88.96	56.64
2016	91.16	85.88	89.06
2017	93.22	87.40	89.08
2018	91.84	86.61	87.55
2019	92.21	91.29	90.56
Año	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad
2012	Excelente	Muy pobre	-
2013	Excelente	Excelente	Excelente
2014	Excelente	Bueno	Bueno
2015	Regular	Bueno	Muy pobre
2016	Excelente	Bueno	Bueno
2017	Excelente	Bueno	Bueno
2018	Excelente	Bueno	Bueno
2019	Excelente	Excelente	Excelente

Elaboración: Autor 2022

La *tabla 27* detalla los resultados del ICA Oregon de las estaciones de la parte media. En la estación TOM – LL – CONTROL en los años del 2012 al 2019 la calidad del agua se clasificó como buena (86.82 – 88.80) y excelente (90.76 – 92.19). Mientras que en el año 2019 hay un declive muy notorio de la calidad del agua clasificándose como muy pobre (27.20), esto se debió a que en dicho año la medición de coliformes fecales arrojó valores muy altos 1756 NMP/100 ml (*ver tabla 18*); como ya se mencionó el índice de Oregon le da una importancia muy elevada a este parámetro.

La calidad del agua en la estación TOM – TOM – 005 en el año 2012 y 2015 fue muy pobre (27.15 – 56.21), por el mismo motivo que presentó concentraciones elevadas de coliformes fecales, mientras que, para los años restantes la calidad se mantuvo como buena y excelente. La calidad del agua en la estación TOM – CU – CONTROL fue muy pobre con valores del ICA en un rango de 20 a 27 en todos los años a excepción del 2015. En el 2015 el ICA Oregon se clasificó como pobre (78.35), esto se debió a que las concentraciones de los coliformes fecales para todos los años de estudio estuvieron por encima de los 1800 NMP/100 ml, el cual es un valor muy elevado para el índice de Oregon.

Tabla 27: Resultados del ICA - índice de Oregon en las estaciones de la parte media

Estaciones de la parte Media			
Estación	TOM – LL – CONTROL	TOM – TOM – 005	TOM – CU – CONTROL
Año	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF
2012	92.19	27.15	27.15
2013	86.82	83.10	27.13
2014	92.13	86.25	27.22
2015	90.76	56.21	78.35
2016	88.80	89.30	26.92
2017	91.81	90.52	27.13
2018	91.57	90.21	20.61
2019	27.20	91.54	27.13
Año	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad
2012	Excelente	Muy pobre	Muy pobre
2013	Bueno	Bueno	Muy pobre
2014	Excelente	Bueno	Muy pobre
2015	Excelente	Muy pobre	Pobre
2016	Bueno	Bueno	Muy pobre
2017	Excelente	Excelente	Muy pobre
2018	Excelente	Excelente	Muy pobre
2019	Muy pobre	Excelente	Muy pobre

Elaboración: Autor 2022

La tabla 28 muestra los resultados del ICA Oregon de las estaciones de la parte baja. La calidad del agua en la estación TOM – TOM – 030 se categorizó como muy pobre con valores del ICA en un rango de 26.87 a 27.11, como ya se mencionó las concentraciones de los coliformes fecales son el factor que conlleva a tener estos resultados. En la estación TOM – TOM – 050 al igual que la anterior estación, la clasificación de calidad del agua se categorizó como muy pobre para todos los años; también se observó que en el 2019 el valor del ICA disminuyó aún más (19.61), este descenso se debió a más de que las concentraciones de los coliformes fecales es muy alta, la concentración de fósforo total fue muy alta de acuerdo a las condiciones de cálculo de subíndices del índice de Oregon.

La calidad del agua en la estación TOM – MIL – CONTROL tuvo valores del ICA muy bajos (16 – 16.5) en todos los años, categorizando el agua como muy pobre, esto se debió a que las concentraciones de los coliformes fecales, fósforo total y sólidos totales fueron muy altas y por ende el valor del subíndice que asigna Oregon para estos valores es de 10 de acuerdo a las condiciones del cálculo de los subíndices mismo que hace que el valor del ICA disminuya. En la estación TOM – TOM – CONTROL la calidad del agua de acuerdo con los valores del ICA se categorizó como muy pobre, sin embargo, en comparación con la estación anterior los valores del ICA fueron mayores, pero en mínima diferencia.

Tabla 28: Resultados del ICA - índice de Oregon en las estaciones de la parte baja

Estaciones de la parte Baja				
Estación	TOM – TOM – 030	TOM – TOM – 050	TOM – MIL – CONTROL	TOM – TOM – CONTROL
Año	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF
2012	26.87	26.600	16.08	18.73
2013	27.08	26.837	16.08	25.99
2014	27.11	27.013	16.10	19.21
2015	27.08	27.043	16.12	26.38
2016	27.10	26.963	16.15	24.86
2017	27.00	26.727	16.14	19.27
2018	27.00	26.949	16.15	26.00
2019	26.91	19.610	16.15	25.49
Año	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad
2012	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre
2013	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre
2014	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre
2015	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre
2016	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre
2017	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre
2018	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre
2019	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre	Muy pobre

Elaboración: Autor 2022

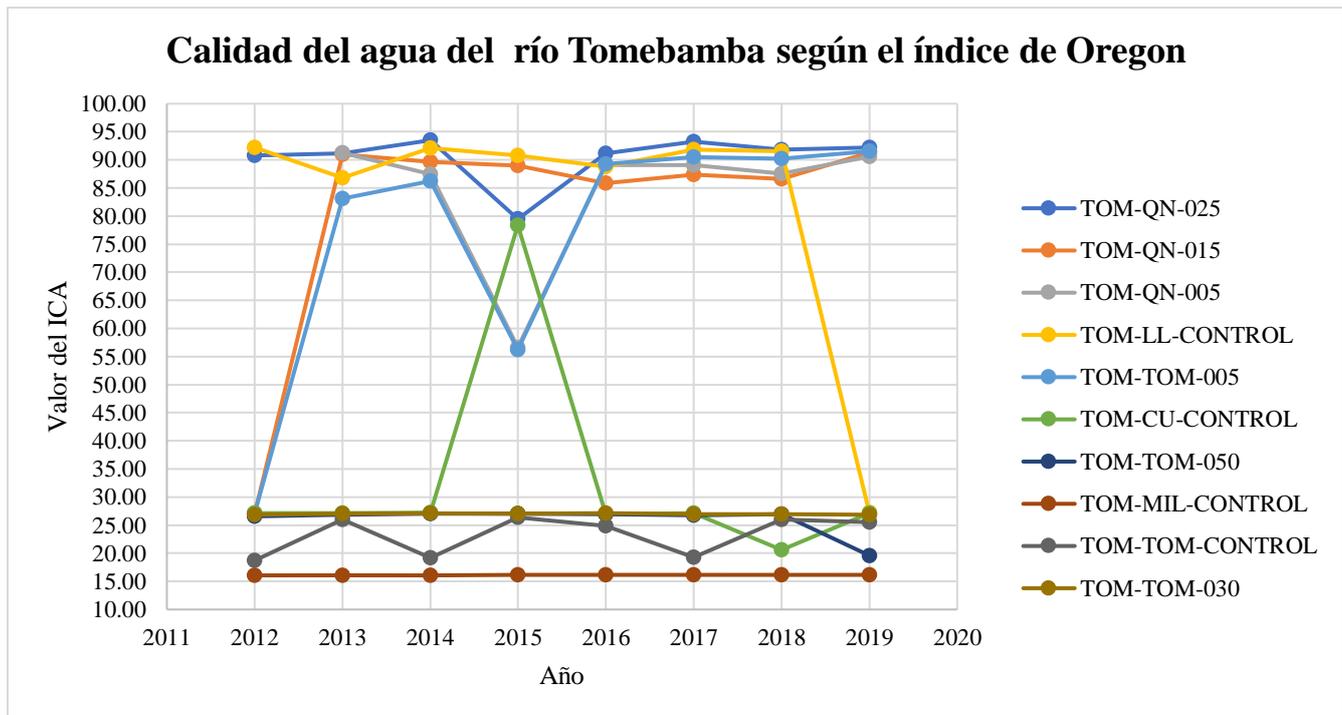


Figura 11: Calidad del agua del río Tomebamba según el índice de Oregon

La figura 11 muestra la representación gráfica de la calidad del agua del río Tomebamba aplicando el índice de Oregon, se puede observar cómo cambia la calidad del agua durante los 8 años de análisis y para cada estación seleccionada. Se observa cambios bruscos principalmente en las estaciones TOM – TOM – 005, TOM – LL – CONTROL y TOM – CU – CONTROL, lo

cual se debió al aumento o disminución de la concentración de los coliformes fecales como ya se detalló anteriormente. Así mismo, se puede observar que en las estaciones de la parte baja los valores del ICA fueron casi similares, mientras que en las estaciones de la parte media la variación de los valores del ICA fue muy notoria. En el *Anexo 6* se muestran la variación de los valores del ICA para cada estación de monitoreo durante los 8 años de análisis

4.1.5 Calidad del agua mediante el índice CCME

Los resultados de la aplicación del índice CCME para determinar la calidad del agua del río Tomebamba, se presentan en la *tabla 29*, a diferencia de los índices anteriores este calculó la calidad del agua por estación considerando los 8 años de estudio. Como ya se mencionó en la sección 3.3.4 la metodología es totalmente diferente y se tomó en cuenta la normativa nacional y los parámetros que cuentan con límite máximo permisible. Para este índice se utilizó 8 parámetros. De acuerdo con la *tabla 29* se observa que las estaciones de la parte alta se categorizaron con valores de 92.69, 82.21 y 84.96, clasificando el agua como buena, esta clasificación de acuerdo con la *tabla 14*.

Tabla 29: Resultados del índice de calidad del agua aplicando el índice CCME para todas las estaciones de monitoreo

Resultados del de la calidad del agua según el índice CCME		
Estaciones analizadas	Valor del ICA	Clasificación de calidad
TOM-QN-025	92.69	Buena
TOM-QN-015	82.21	Buena
TOM-QN-005	84.96	Buena
TOM-LL-CONTROL	92.02	Buena
TOM-TOM-005	70.59	Regular
TOM-CU-CONTROL	48.15	Marginal
TOM-TOM-030	37.87	Pobre
TOM-TOM-050	33.23	Pobre
TOM-MIL-CONTROL	26.43	Pobre
TOM-TOM-CONTROL	30.56	Pobre

Elaboración: Autor 2022

Las estaciones de la parte media se clasificaron como buena (92.02), regular (70.59) y marginal (48.15), mientras que las estaciones de la parte baja dieron resultados de un agua de calidad pobre. Al igual que los resultados de los índices anteriores, las estaciones de la parte baja presentaron un menor valor del ICA y por ende la calidad del agua fue sumamente mala. En la *Figura 12* presenta la variación de la calidad del agua desde la estación de la parte alta hasta la última estación de la parte baja, claramente se observa que los valores del ICA CCME para cada estación fueron en descenso, lo cual tiene sentido en vista que las concentraciones de los parámetros de la parte alta fueron menores. Conforme la calidad del agua disminuyó, la concentración de los parámetros

aumentó; así mismo, en la parte baja la concentración de los parámetros medidos aumentaron mucho más, esto debido a que dichas estaciones se encuentran en toda la parte urbana de la ciudad de Cuenca por lo que la contaminación es mucho mayor en comparación a la parte alta.

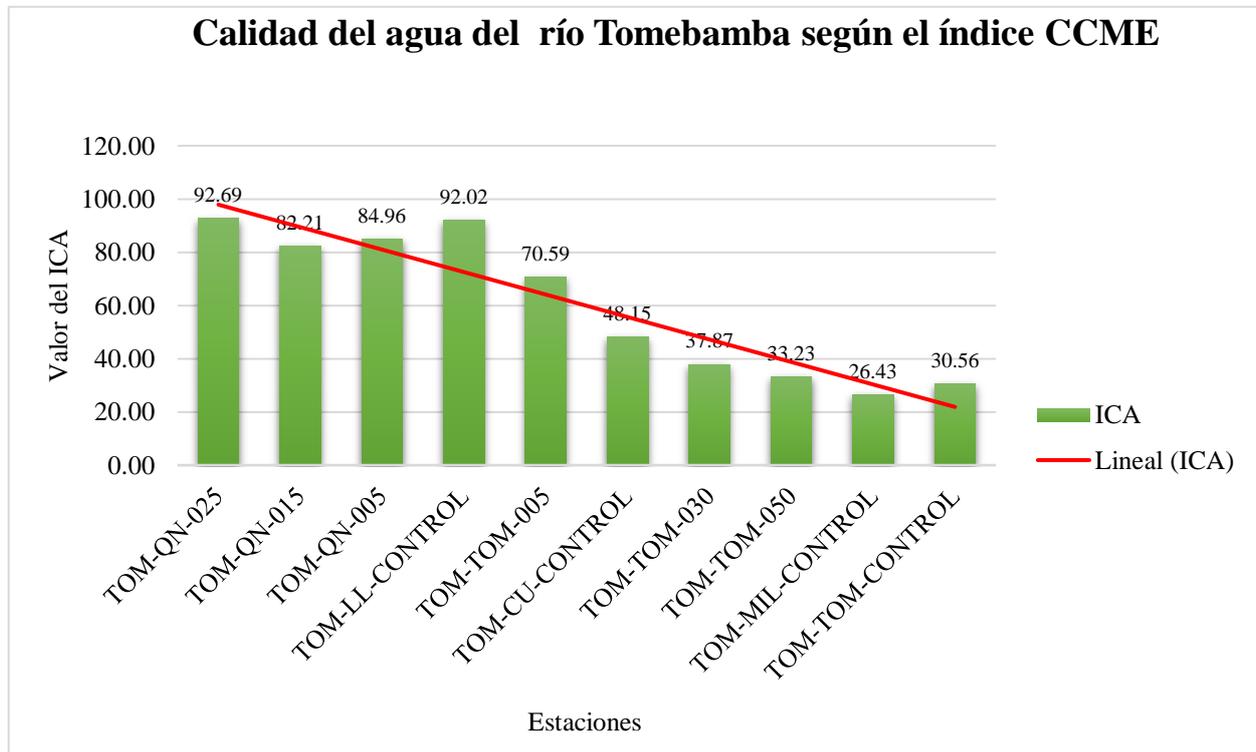


Figura 12: Calidad del agua del río Tomebamba aplicando el índice CCME

4.2 Identificación de los parámetros para la creación del propio índice del río Tomebamba

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas de normalidad y análisis de correlación realizados a los parámetros de calidad del agua para identificar los parámetros que mayor correlación presentan y ser escogidos para la creación del propio índice del río Tomebamba.

4.2.1 Resultados de la prueba de normalidad

La *tabla 30* muestra los resultados de la prueba de normalidad realizada a los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua del río Tomebamba. Aplicando la herramienta del software Excel, Real Statistics se comprobó la normalidad o no de los datos, donde se acepta una distribución normal de los datos si los valores del $p - Value$ son mayores a α (0.05) nivel de significancia tanto para la prueba de Shapiro Wilk – Test y D’Agostino – Pearson. Para los coliformes fecales, totales y los sólidos totales el valor o de $p - Value$ en ambas pruebas fue menor al valor de alfa, por ende, no se aceptó la normalidad. Por otra parte, los parámetros restantes si

cumplían con la condición del p – Value y se aceptó la normalidad de los datos. En base a esto se procedió al cálculo de correlación de Pearson.

Tabla 30: Prueba de normalidad de los parámetros para la selección de parámetros para el propio índice

Prueba de normalidad para los parámetros de calidad del agua			
Parámetro	Shapiro Wilk – Test	D'Agostino – Pearson	Normalidad
	p – Value	p – Value	
% oxígeno disuelto	0.6409	0.5624	Si
Potencial de hidrógeno	0.4822	0.4465	Si
Alcalinidad	0.8083	0.9263	Si
Coliformes fecales	2.74*10 ⁻⁸	5.31*10 ⁻¹¹	No
Coliformes totales	1.36*10 ⁻⁵	1.90*10 ⁻⁴	No
Color	0.6299	0.5565	Si
Conductividad	0.3332	0.5258	Si
Dureza	0.3170	0.1836	Si
DBO	0.0817	0.3228	Si
Fosfatos	0.2544	0.5043	Si
Fosforo total	0.2544	0.5043	Si
Nitratos	0.7645	0.8259	Si
Sólidos totales	0.0376	0.00193	No
Temperatura	0.0574	0.2015	Si
Turbiedad	0.1486	0.3392	Si

Elaboración: Autor 2022

4.2.2 Análisis de correlación

Una vez comprobada la normalidad o no de los datos, de acuerdo con la *tabla 30*, de los 15 parámetros 12 siguen una distribución normal y 3 una distribución no normal. En base a estos resultados se aplicó el análisis de correlación de Pearson puesto que la mayoría de los parámetros siguen una distribución normal, los resultados se muestran en la *tabla 31*. Se presenta de color café los parámetros que mayor correlación positiva presentaron (mayor a 0.6) y de color crema se presenta los valores de los parámetros con mayor correlación negativa. Un dato importante es que en los coliformes fecales y totales los valores de correlación son mayores; sin embargo, solo se consideró los coliformes fecales entre los parámetros seleccionados. De acuerdo con el análisis de correlación los parámetros que se seleccionaron fueron: 1. Coliformes fecales; 2. Color; 3. Dureza; 4. Turbiedad; 5. DBO; 6. % de oxígeno disuelto; 7. Temperatura; 8. Sólidos totales. Adicional a estos parámetros y muy aparte del análisis de correlación se consideró dos parámetros más; el potencial de hidrógeno y los nitratos, esto en vista que, dichos parámetros están considerados dentro de la normativa nacional y son sumamente importantes para el análisis de calidad del agua.

4.3 Resultados del índice propio basado en un proceso de jerarquía analítica

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para la creación del propio índice del río Tomebamba basado en el proceso de jerarquía analítica.

4.3.1 Resultados de la estructuración de una jerarquía

La figura 13 muestra el resultado de la estructuración de la jerarquía, teniendo en cuenta los parámetros seleccionados anteriormente. En la gráfica se observa que el AHP presenta un solo nivel de jerarquía que representa el objetivo general y está formado por los 10 parámetros seleccionados. Como objetivo general y en nivel superior de la jerarquía está la determinación de los pesos de los parámetros de calidad del agua para el índice de calidad del agua del río Tomebamba, mientras que como objetivos específicos y en el nivel inferior están los parámetros seleccionados.

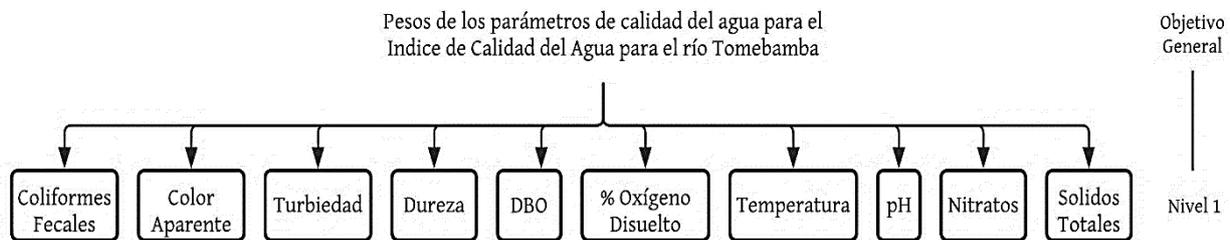


Figura 13: Jerarquía estructurada para la determinación de los pesos del AHP

Elaboración: Autor 2022

4.3.1 Resultados de las matrices de comparación por pares de los encuestados

Las matrices de comparación por pares fueron realizadas por dos grupos, el primer grupo está conformado por expertos conocedores del tema (docentes, especialistas en calidad del agua, ingenieros ambientales) y el segundo grupo por alumnos estudiantes de la carrera de ingeniería ambiental. En la tabla 32 se presentan el número total de encuestados y los que accedieron a llenar la encuesta.

Por otra parte, en el Anexo 7 se presenta una de las matrices llenadas por una persona del grupo 1 como ejemplo, en base a esas matrices se calculó los pesos de los parámetros seleccionados.

Tabla 31: Número de encuestados que se tomó en cuenta

Grupos	Número de encuestados	Llenaron la encuesta
Grupo 1	11	6
Grupo 2	9	8
Total	20	14

Elaboración: Autor 2022

Tabla 32: Resultados del análisis de correlación para la selección de parámetros

Parámetros	% oxígeno	pH	Alcalinidad	Coliformes Fecales	Coliformes Totales	Color	Conductividad	Dureza	DBO	Fosfatos	Fósforo Total	Nitratos	Sólidos Totales	Temperatura	Turbiedad
% oxígeno	1.000														
pH	0.133	1.000													
Alcalinidad	-0.737	-0.055	1.000												
Coliformes Fecales	-0.782	0.063	0.640	1.000											
Coliformes Totales	-0.748	0.084	0.594	0.963	1.000										
Color	-0.624	-0.114	0.595	0.694	0.660	1.000									
Conductividad	-0.876	-0.066	0.782	0.681	0.666	0.438	1.000								
Dureza	-0.812	0.035	0.828	0.739	0.714	0.613	0.851	1.000							
DBO	-0.774	0.005	0.781	0.676	0.594	0.601	0.826	0.820	1.000						
Fosfatos	-0.716	0.021	0.654	0.695	0.787	0.603	0.745	0.763	0.680	1.000					
Fósforo Total	-0.716	0.021	0.654	0.695	0.787	0.603	0.745	0.763	0.680	1.000	1.000				
Nitratos	-0.490	-0.065	0.431	0.421	0.376	0.328	0.513	0.514	0.587	0.350	0.350	1.000			
Sólidos Totales	-0.860	0.018	0.819	0.894	0.856	0.806	0.814	0.876	0.812	0.777	0.777	0.441	1.000		
Temperatura	-0.631	-0.023	0.645	0.552	0.545	0.579	0.665	0.621	0.731	0.604	0.604	0.490	0.674	1.000	
Turbiedad	-0.600	-0.011	0.641	0.694	0.661	0.941	0.425	0.669	0.565	0.554	0.554	0.294	0.821	0.551	1.000

Elaboración: Autor 2022

4.3.1 Resultados de la obtención de los pesos

Con la ayuda del Software Expet Choise se obtuvieron los pesos de cada matriz de comparación por pares (*ver anexo 8*), luego estos resultados se agregaron para obtener el peso final de cada parámetro, para esto se aplicó el método de la media geométrica en el software Excel. En la *tabla 33* se presentan los pesos para cada parámetro seleccionado.

Tabla 33: resultados de los pesos para cada parámetro seleccionado

Parámetros	Pesos - ponderaciones
Coliformes fecales	0.230
Color	0.127
Dureza	0.099
DBO	0.118
Turbiedad	0.081
% Oxígeno disuelto	0.085
Sólidos totales	0.055
Nitratos	0.049
pH	0.050
Temperatura	0.038

Elaboración: Autor 2022

De acuerdo con los resultados de la *tabla 33* el parámetro que mayor peso presentó fueron los coliformes fecales (0.230), a este le sigue el color (0.127), la demanda bioquímica de oxígeno (0.118), el parámetro que menor ponderación obtuvo fue la temperatura (0.038).

Es importante mencionar que estas ponderaciones están de acuerdo con los pesos individuales obtenidos de 10 encuestados. Se consideró estos 10 encuestados en vista que la relación de coherencia (C.R) fue menor a 0.10, estos resultados de los pesos individuales se presentan en la *tabla 34*. Como se observa en la *tabla 34* y de acuerdo con 10 encuestados los coliformes fecales tienen la mayor ponderación, a este le siguen la DBO y el color, se observa que los pesos varían de acuerdo con los encuestados; sin embargo, la temperatura sigue siendo el parámetro que menor peso o importancia le asignan. Los resultados de los pesos de las 14 personas que llenaron la encuesta se pueden ver en el *anexo 9* junto con los valores de relación de coherencia, en los 4 encuestados que no se consideró el valor de C.R es mayor a 0.10, se excluyen estos pesos ya que según Saaty. (1987) el AHP toma en cuenta la evaluación de la coherencia, en vista de que en la práctica es difícil alcanzar un juicio 100 % coherente, con esto se garantiza que las comparaciones por pares estén dentro de un rango de coherencia aceptable.

Tabla 34: Resultados de los pesos individuales de los 10 encuestados que presentaron relación de coherencia menor a 0.10

Parámetros	Pesos de los encuestados con relación de coherencia menor a 0.10									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Coliformes fecales	0.283	0.242	0.288	0.151	0.217	0.228	0.233	0.266	0.145	0.316
Color	0.099	0.088	0.201	0.271	0.124	0.069	0.278	0.076	0.135	0.098
Dureza	0.088	0.065	0.135	0.091	0.125	0.069	0.187	0.065	0.095	0.127
DBO	0.181	0.156	0.094	0.067	0.149	0.168	0.075	0.146	0.104	0.107
Turbiedad	0.046	0.071	0.076	0.155	0.077	0.058	0.087	0.072	0.107	0.109
% Oxígeno disuelto	0.104	0.171	0.057	0.051	0.13	0.167	0.036	0.128	0.095	0.041
Sólidos totales	0.055	0.047	0.044	0.06	0.052	0.045	0.041	0.102	0.083	0.044
Nitratos	0.103	0.05	0.038	0.045	0.035	0.046	0.031	0.056	0.082	0.042
pH	0.032	0.063	0.038	0.061	0.05	0.078	0.019	0.053	0.078	0.068
Temperatura	0.01	0.049	0.029	0.088	0.042	0.071	0.013	0.036	0.076	0.047
Sumatoria	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Relación de coherencia	0.081	0.060	0.011	0.067	0.094	0.081	0.067	0.094	0.074	0.087

Elaboración: Autor 2022

La figura 14 presenta un Box Plot de los pesos, se observa como varían los pesos asignados a cada parámetro de acuerdo con los encuestados. Los coliformes fecales fue el parámetro que mayores pesos le asignaron en un rango de 0.22 a 0.31, sin embargo, de acuerdo a la figura existen datos que se encuentran fuera del rango (0.15 – 0.14), el color es el segundo parámetro con mayor peso presentando valores de 0.076 hasta 0.278, es decir existe una variación significativa de los pesos, el % de oxígeno disuelto también presenta variación en los valores pero menores al color, para el pH, temperatura y dureza no existe mucha variación en los datos ya que los valores están dentro de un rango pequeño. Mientras que en la turbiedad, nitratos y sólidos totales la variación es menor, pero en algunos casos los valores están fuera del rango de variación, los cuales se consideran atípicos de acuerdo a la figura se consideran atípicos. Cabe recalcar que el color plomo del box-plot para cada parámetro presenta la cantidad de datos que se encuentran dentro del cuartil 1, el color amarillo a los valores presentes dentro del cuartil 3 y la “x” presenta la media de los datos (pesos).

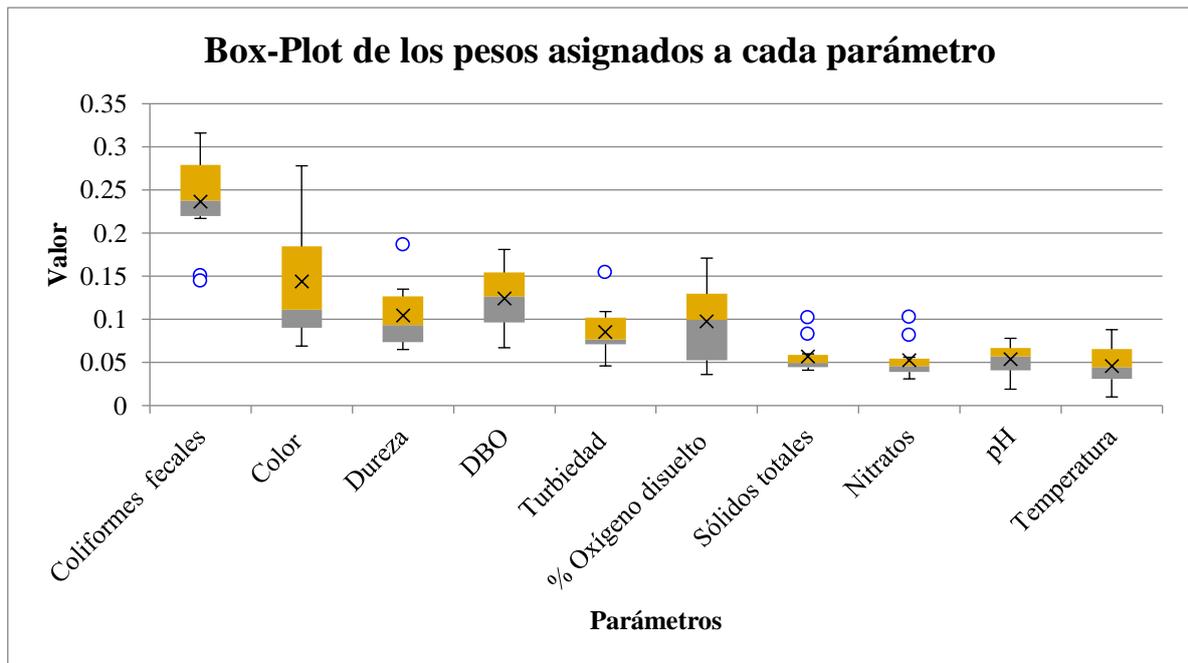


Figura 14: Box-plot de los pesos de cada parámetro seleccionado

4.4 Calidad del agua de río Tomebamba aplicando el índice propio

Una vez obtenido los pesos de los parámetros aplicando el AHP, se calculó el índice de calidad del agua del río Tomebamba para las estaciones seleccionadas y en los 8 años de análisis. En las tablas 35 a la 37 se presentan los resultados obtenidos.

La tabla 35 presenta los resultados para las estaciones de la parte alta. Para la estación TOM – QN – 025 la calidad del agua con el índice propio se encontró entre excelente y buena, a excepción del año 2015 donde la calidad se categorizó como medio (69.48), siendo el único valor de calidad más bajo. La calidad del agua en la estación TOM – QN – 015 se clasificó como medio (61.02) en el 2012 y en el resto de los años la calidad se mantuvo como buena. En la estación TOM – QN – 005 la calidad del agua se clasificó como medio (62.03) en el año 2015, al igual que en la primera estación, para el resto de los años la calidad del agua se mantuvo como buena. De manera general, la calidad del agua en la parte alta del río Tomebamba se mantuvo como buena y en algunos casos como excelente.

La tabla 36 muestra los resultados de la calidad del agua usando el propio ICA del río Tomebamba para la parte media. La calidad del agua en la estación TOM – LL – CONTROL presentó un tipo de agua de buena calidad en la mayoría de los años a excepción del 2019 donde la calidad fue media (67.98). La calidad del agua en la estación TOM – TOM – 005 se categorizó como buena solamente en los años 2016, 2017 y 2018 con valores del ICA 84.42, 83.84 y 84.94 respectivamente, mientras que en los años restantes la calidad del agua se categorizó como media. La calidad del agua en la estación TOM – CU – CONTROL en los 8 años de estudio se presentó como medio. En base a estos resultados obtenidos se puede notar que comparando los resultados

de las estaciones de la parte alta con las de la parte media solamente la estación TOM – LL – CONTROL presentó resultados similares a las estaciones de la parte alta. Por otra parte, en las estaciones TOM – TOM – 005 y TOM – CU – CONTROL los resultados del valor del ICA fueron mucho menores que los de las estaciones anteriores, esto se asume a que dichas estaciones ya se encuentran en la parte urbana de la parroquia Sayausí por donde atraviesa el río Tomebamba.

Tabla 35: Resultados de la calidad del agua del río Tomebamba con el índice propio para las estaciones de la parte alta

Estaciones de la parte Alta			
Estación	TOM – QN – 025	TOM – QN – 015	TOM – QN – 005
Año	ICA – OREGON	ICA – OREGON	ICA – OREGON
2012	90.56	61.02	-
2013	88.62	88.60	86.01
2014	89.31	77.81	73.45
2015	69.48	82.47	62.03
2016	92.38	77.29	87.26
2017	91.98	81.01	85.13
2018	92.44	78.77	83.67
2019	92.21	77.63	73.56
Año	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad
2012	Excelente	Medio	-
2013	Buena	Buena	Buena
2014	Buena	Buena	Buena
2015	Medio	Buena	Medio
2016	Excelente	Buena	Buena
2017	Excelente	Buena	Buena
2018	Excelente	Buena	Buena
2019	Excelente	Buena	Buena

Elaboración: Autor 2022

Con respecto a las estaciones de la parte baja, en la *tabla 37* se presentan los resultados de la calidad del agua del río Tomebamba aplicando el índice propio. La calidad del agua en la estación TOM – TOM – 030 en los años 2015 y 2019 se clasificó como mala (45.36 y 45.10), mientras que en los otros años se clasificó como medio. La estación TOM – TOM – 050 presentó resultados similares a la estación anterior, sin embargo, a esta se suma el año 2017 con calidad de agua mala. La calidad del agua en la estación TOM – MIL – CONTROL es la que peores resultados de calidad del agua presentó en los 8 años de análisis, en el 2012 el valor del ICA fue de 23.11 categorizando al agua como muy mala y siendo el valor más bajo en comparación con todas las estaciones, para el resto de los años la calidad del agua fue mala. Mientras que, en la estación TOM – TOM – CONTROL solo en el año 2014 el valor del ICA ascendió a 54.39 categorizando al agua como de buena calidad. De acuerdo con este análisis se observa que, en las estaciones de la parte baja la calidad del agua fue desfavorable, esto en vista de las altas concentraciones de los valores de los parámetros.

Tabla 36: Resultados de la calidad del agua del río Tomebamba con el índice propio para las estaciones de la parte media

Estaciones de la parte Media			
Estación	TOM – LL – CONTROL	TOM – TOM – 005	TOM – CU – CONTROL
Año	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF
2012	86.86	61.35	56.96
2013	86.47	64.79	63.97
2014	86.97	69.12	65.99
2015	85.66	63.11	67.18
2016	78.17	84.42	58.52
2017	88.44	83.84	60.40
2018	88.58	84.94	58.98
2019	67.98	62.53	54.16
Año	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad
2012	Buena	Medio	Medio
2013	Buena	Medio	Medio
2014	Buena	Medio	Medio
2015	Buena	Medio	Medio
2016	Buena	Buena	Medio
2017	Buena	Buena	Medio
2018	Buena	Buena	Medio
2019	Medio	Medio	Medio

Elaboración: Autor 2022

Tabla 37: Resultados de la calidad del agua del río Tomebamba con el índice propio para las estaciones de la parte baja

Estaciones de la parte Baja				
Estación	TOM – TOM – 030	TOM – TOM – 050	TOM – MIL – CONTROL	TOM – TOM – CONTROL
Año	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF	ICA – NSF
2012	58.73	54.78	23.11	45.79
2013	59.45	52.45	31.35	47.26
2014	66.85	60.85	31.64	54.39
2015	45.36	55.27	42.71	45.81
2016	62.60	59.03	41.87	45.82
2017	63.11	44.83	41.32	45.06
2018	56.94	55.23	34.67	46.61
2019	45.10	49.47	34.67	45.04
Año	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad	Clasificación de calidad
2012	Medio	Medio	Muy malo	Malo
2013	Medio	Medio	Malo	Malo
2014	Medio	Medio	Malo	Buena
2015	Malo	Malo	Malo	Malo
2016	Medio	Medio	Malo	Malo
2017	Medio	Malo	Malo	Malo
2018	Medio	Medio	Malo	Malo
2019	Malo	Malo	Malo	Malo

Elaboración: Autor 2022

La *figura 15* presenta la variación de la calidad del agua según el ICA propio del río Tomebamba. En las estaciones de la parte alta, media y baja durante los 8 años los resultados son muy similares a los resultados de los índices anteriores. La estación TOM – MIL – CONTROL fue la que menores valores del ICA presentó, así mismo los resultados para las estaciones de la parte media y baja de manera general se encuentran con valores muy similares, es decir con pequeñas variaciones, sin embargo, las estaciones de la parte baja presentaron resultados mucho menores en comparación a las de la parte media. Por otra parte, en el 2015 para la estación TOM – QN – 025 el valor del ICA disminuye considerablemente, esto se asume ya que la concentración de los coliformes fecales fue muy alta por ende el valor del subíndice es menor, generando que el valor ICA sea bajo. Para las otras estaciones que presentaron estos descensos se debió a que los valores de los parámetros fueron muy elevados y sobrepasan la normativa. En el *anexo 10* se puede observar la variación de la calidad del agua del río Tomebamba según el índice propio para cada estación de monitoreo.

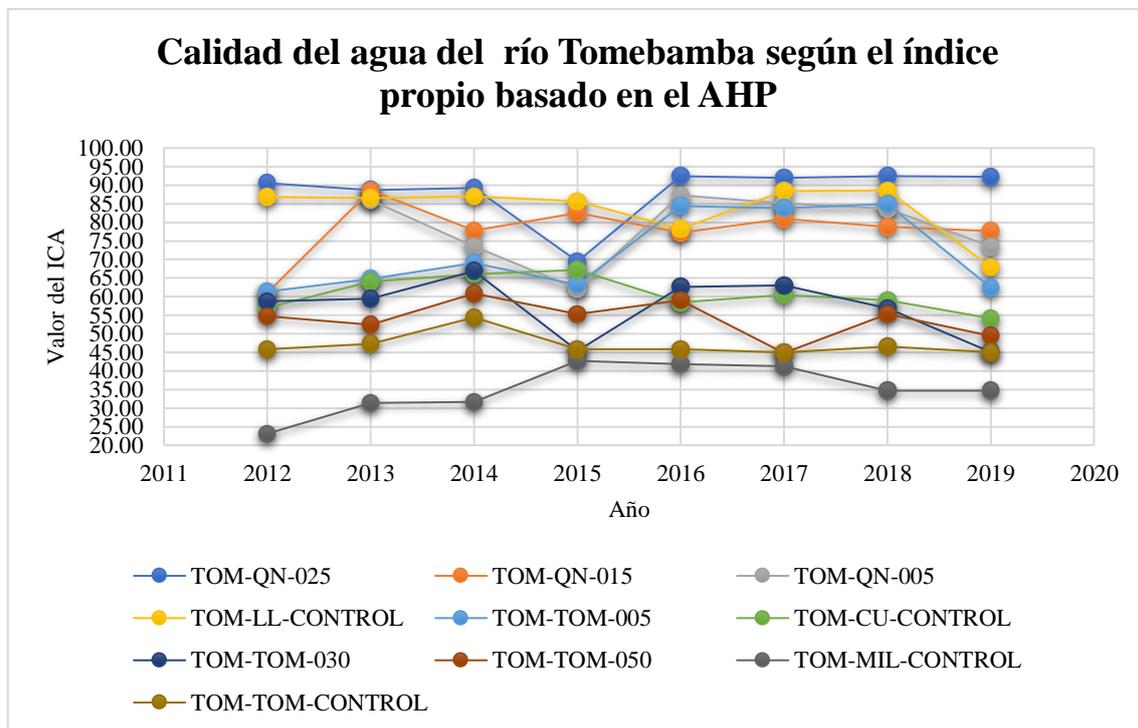


Figura 15: Calidad del agua del río Tomebamba según el índice propio - AHP

4.5 Análisis de correlación del índice propio con el NSF y el índice de Dinius

La *tabla 38* presenta los resultados del análisis de correlación (r) del índice propio basado en el proceso de jerarquía analítica con el índice NSF y el índice de Dinius, claramente se observa que los valores de r son todos positivos. Correspondiente a la correlación con el índice NSF los valores más cercanos a 1 corresponden a las estaciones TOM – QN – 005 (0.923), TOM – LL – CONTROL (0.895), TOM – QN – 015 (0.888) y TOM – TOM – 050 (0.803), no obstante las estaciones restantes también presentan una buena correlación ya que el valor de r se encuentra

por encima de 0.5 a excepción de las estaciones TOM – CU – CONTROL (0.482) y TOM – TOM – CONTROL (0.195) que presentan una correlación menor a 0.5.

Por otra parte, el análisis de correlación con el índice de Dinius presenta valores muy similares con los valores del NSF, la estación TOM – QN – 005 (0.825) al igual que el caso anterior es la que mayor correlación presenta a esta le sigue la estación TOM – TOM – 050 (0.804), sin embargo las estaciones que menor correlación presentaron fueron la TOM – TOM – 030 (0.241), TOM – TOM – CONTROL (0.422), TOM – CU – CONTROL (0.430) y TOM – TOM – 025 (0.433), a pesar de ello los resultados muestran que los valores del ICA del índice propio con los del NSF y el índice de Dinius se encuentran fuertemente correlaciones en la mayoría de las estaciones.

Tabla 38: Resultados del análisis de correlación entre el índice propio, el índice NSF y el índice de Dinius

Estaciones	Coeficiente correlación	
	NSF – Índice propio	Dinius – Índice propio
TOM - QN - 025	0.666	0.433
TOM - QN - 015	0.888	0.716
TOM - QN - 005	0.932	0.825
TOM - LL - CONTROL	0.895	0.792
TOM - TOM - 005	0.667	0.753
TOM - CU - CONTROL	0.482	0.430
TOM - TOM - 030	0.546	0.241
TOM - TOM - 050	0.803	0.804
TOM - MIL - CONTROL	0.691	0.699
TOM - TOM - CONTROL	0.195	0.422

Elaboración: Autor 2022

En el *anexo 11 y 12* se presenta la representación gráfica del análisis de correlación entre NSF con el índice propio e índice de Dinius con el índice propio, para cada estación de monitoreo analizada.

4.6 Análisis de regresión lineal múltiple

La matriz de correlación de los parámetros respecto al ICA del índice propio se presenta en la *tabla 39*, en esta matriz se puede observar los coeficientes de cada parámetro y su respectiva significancia. De acuerdo con los resultados, los parámetros: coliformes fecales, DBO, turbiedad, % de oxígeno, sólidos totales y temperatura presentaron correlación significativa respecto al ICA ya que los valores en términos absolutos están por encima de 0.5, no obstante, la dureza y nitratos a pesar de presentar valores por debajo de los 0.5 son correlaciones muy significativas, mientras que el pH presentó un valor de correlación 0.074 lo cual no es tan significativo. De acuerdo al estudio realizado por Helena et al. (2000) en cuanto a los valores de correlación menciona que; correlaciones con un coeficiente mayor o igual a 0.5 considerando el valor absoluto, son

correlaciones muy fuertes, por lo que se corrobora los resultados del análisis de correlación como fuertemente significativa en todos los parámetros.

Tabla 39: Coeficientes de correlación de los parámetros respecto al ICA propio

Variables	ICA	Coliformes fecales	Color	Dureza	DBO	Turbiedad	% de Oxígeno	Solidos totales	Nitratos	pH	Temperatura
ICA	1	-0.560	-0.683	-0.480	-0.658	-0.591	0.523	-0.643	-0.497	0.074	-0.687
Significancia		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.257	0.000

Elaboración: Autor 2022

Una vez que se identificaron los parámetros con coeficientes de correlación significativa con el ICA, estos se utilizaron para la construcción de un modelo de regresión lineal múltiple. El modelo resultó ser significativo con los 10 parámetros que se realizó el análisis de correlación, lo que significa que estos agregan toda la información al modelo. A pesar de ello y de acuerdo con los resultados de correlación se puede omitir el pH en el modelo, pero para este caso se consideraron todos los 10 parámetros. La *tabla 40* muestra el análisis de regresión lineal para el modelo generado.

Tabla 40: Resumen del modelo de regresión lineal múltiple

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado
Predictores: (Constante), Temperatura, pH, Nitratos, Turbiedad, Oxígeno, Coliformes, DBO, Dureza, Color, Solidos	0,831	0.6910	0.6455

Elaboración: Autor 2022

Se observa que el valor de R^2 para el modelo es de 0.6910, esto nos quiere decir que el modelo generado explica el 69.10 % de la varianza del ICA propio en esta regresión, esto se corrobora con el estudio realizado por Valentini et al. (2021) “Análisis de regresión lineal múltiple (MLR) aplicado para modelar una nueva ecuación WQI para monitorear la calidad del agua de la laguna Mirim, en el estado de Rio Grande do Sul-Brasil” en la que el valor del R^2 para el modelo seleccionado es de 0.78 valor cercano al obtenido en la ecuación del presente estudio.

Para corroborar estos resultados la *tabla 41* presenta el análisis de ANOVA del modelo, donde se observa los residuos, los cuadrados medios y la significancia del modelo, dicha significancia esta medida con un nivel de confianza del 95 % y un nivel de significancia del 5 %, en base a esto el valor de significancia del modelo es menor al 5 % lo cual indica que se abarca toda la información con los 10 parámetros seleccionados. Cabe recalcar que la ecuación generada con los 10 parámetros es la que mejor se ajusta a los valores reales.

Los coeficientes de la ecuación de regresión lineal múltiple se presentan en la *tabla 42*, a partir de estos valores se extrajo la *ecuación 13* para el cálculo del ICA.

Tabla 41: Análisis ANOVA para el modelo de regresión lineal

Modelo	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Significancia
Regresión	17416.3165	1741.63165	0.0000062
Residuo	7787.91396	114.528146	
Total	25204.2305		

Elaboración: Autor 2022

Tabla 42: Resultados de los coeficientes para la ecuación de acuerdo con modelo

Parámetros	Coefficientes
(Constante)	147.831496
Coliformes fecales	1.8476E-07
Color	-0.1208151
Dureza	0.23422066
DBO	-1.08204019
Turbiedad	0.42594722
% de Oxígeno disuelto	-0.50676678
Sólidos totales	-0.09130605
Nitratos	-7.54786891
pH	1.27738004
Temperatura	-2.66144843

Elaboración: Autor 2022

$$Y = 147.8214 + 1.8476x10^{-7} * X1 - 0.1208 * X2 + 0.2342 * X3 - 1.0820 * X4 + 0.4259 * X5 - 0.5067 * X6 - 0.0913 * X7 - 7.5478 * X8 + 1.2773 * X9 - 2.6614 * X10 \quad (13)$$

Donde Y representa el valor del ICA propio para el río Tomebamba, X1 los coliformes fecales, X2 el color, X3 la dureza, X4 la DBO, X5 la turbiedad, X6 el % de oxígeno disuelto, X7 los sólidos totales, X8 los nitratos, X9 el pH y X10 la temperatura.

De acuerdo a los resultados del índice propio los valores y la calidad del agua son similares para cada estación, de acuerdo a Pacheco & Quiroz. (2021) se corrobora la eficacia de los resultados, puesto que en su estudio crean un propio índice para el río Migüir, obteniendo resultados similares del índice desarrollado con el índice NSF. El descenso del valor del ICA en la mayoría de las estaciones se debe principalmente a las altas concentraciones de los coliformes fecales, según Pauta et al. (2019) en todos los ríos los coliformes fecales son el parámetro que más incide en la calidad del agua.

En cuanto a los resultados por zonas (alta, media y baja) las peores condiciones se presentan en la parte baja, según el estudio “Evaluación de la calidad del agua de los ríos de la ciudad de Cuenca, Ecuador” realizado por Pauta et al. (2019) el río Tomebamba puede ser considerado el

cuerpo receptor más crítico referente a la contaminación, ya que en la parte baja la calidad del agua es muy mala y solo puede ser usada para transporte y asimilación de desechos, mientras que en las cabeceras (parte alta) la calidad del agua es satisfactoria, pero esta calidad comienza a deteriorarse paulatinamente a partir de la parte media, experimentando una notable degradación en el área urbana de la ciudad, con esto se corroboran los resultados obtenidos de la calidad del agua del río Tomebamba aplicando los 4 índices ya establecidos y el índice propio.

La metodología del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para la obtención de los pesos de los parámetros más importantes en la creación del propio índice, determinó que los pesos más altos corresponde a los coliformes fecales, color, DBO y % de oxígeno disuelto, esto se corrobora con el estudio realizado por Sutadian et al. (2017) “Uso del proceso de jerarquía analítica para identificar pesos de parámetros para desarrollar un índice de calidad del agua” mismo que es uno de los pasos más importantes en el desarrollo de un WQI, donde determinaron que los parámetros con mayor peso fueron la DBO junto con el oxígeno disuelto, así mismo otro estudio realizado por Abtahi et al. (2015) “Un índice modificado de la calidad del agua potable (DWQI) para evaluar la calidad del agua potable en las comunidades rurales de la provincia de Juzestán, Irán” en la que también aplican el AHP para la asignación de pesos determinaron que los coliformes fecales es segundo parámetro con mayor peso.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El presente estudio evaluó la calidad del agua del río Tomebamba aplicando 4 índices ya establecidos en otras partes del mundo y mediante la creación del índice propio basado en un proceso de jerarquía analítica para la identificación de los pesos de los parámetros más importantes que fueron medidos por las diferentes estaciones de monitoreo de ETAPA EP.

Mediante el desarrollo de esta investigación se logró determinar de forma detallada la calidad del agua del río Tomebamba en un periodo de 8 años (2012 – 2019), utilizando las mediciones de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos medidos en 10 estaciones de monitoreo seleccionadas adecuadamente. En tal sentido y de manera general, la calidad del agua del río Tomebamba en la parte altas es mayor que en la parte baja, debido a que, las estaciones de monitoreo de la parte alta se encuentran ubicadas en el Parque Nacional Cajas, por lo que la contaminación y la concentración de contaminantes es menor; sucediendo todo lo contrario en las estaciones de la parte baja, ya que están ubicadas a lo largo del río que atraviesa la parte urbana de la ciudad de Cuenca.

Según los valores del ICA obtenidos a partir del índice NSF las estaciones de la parte alta y media presentan una calidad de agua buena en la mayoría de los años analizados, mientras que las estaciones ubicadas en la parte baja categorizaron la calidad del agua como media y mala. Por otra parte, y de acuerdo con los valores obtenidos del índice de Dinius, con respecto al criterio general y al igual que el índice anterior la calidad del agua en las estaciones de las partes altas es aceptable a excepción de algunos años que se clasificó como contaminado, mientras que en las estaciones de la parte media y baja se clasificó el agua como contaminada y muy contaminada. Sin embargo, el índice de Dinius clasifica el agua de acuerdo a usos específicos, para este caso y considerando que el río es fuente de abastecimiento para la planta de tratamiento de agua potable “El Cebollar”, se clasificó el agua de acuerdo al consumo humano, por lo que los resultados demostraron que en las estaciones de la parte alta el agua en algunos años requería una purificación menor y en otros no requiere de purificación para el consumo, en la parte media se requiere una purificación menor, en la parte baja el agua requiere de un tratamiento y en algunos años es dudoso para consumo.

El índice de Oregon al ser un índice más estricto, los valores del ICA variaron en gran medida en cada estación, considerando que este índice le da un peso importante a los coliformes fecales, cuando el valor de dicho parámetro supera la normativa, el valor del ICA disminuyó considerablemente. Finalmente, el índice CCME ayudó a corroborar la lógica de que en las partes

altas la calidad del agua es mayor que en las partes bajas, puesto que con este se determinó la calidad del agua por estación.

Se logró identificar de los 15 parámetros que miden las estaciones de monitoreo seleccionadas, los más importantes para la creación del índice propio, siendo 10 los seleccionados: coliformes fecales, color, dureza, demanda bioquímica de oxígeno, turbiedad, porcentaje de oxígeno disuelto, sólidos totales, nitratos, potencial de hidrógeno y la temperatura, esta selección en base al análisis de correlación que presentaron los valores medidos.

Al utilizar la metodología del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la asignación de pesos de los parámetros seleccionados se logró establecer las ponderaciones de acuerdo a la valoración de los encuestados, siendo los coliformes fecales el parámetro que mayor peso obtuvo con un valor de 0.23 seguido del color (0.127) y la DBO₅ (0.118), comparando estos pesos con los que asigna el índice NSF se corrobora que los coliformes fecales son los que mayor importancia tiene seguido de la DBO₅, con la obtención de estos pesos se determinó la calidad del agua del río Tomebamba aplicando el índice propio. Los resultados obtenidos del índice propio demostraron que la calidad del agua en las estaciones de la parte alta se clasificó como de buena y excelente calidad, en la parte media se clasificó el agua como de media y mala calidad, mientras que en la parte baja la calidad es mala, resultados que son similares a los índices anteriores.

Mediante el análisis de correlación para validar el índice propio, los resultados del r fueron muy altos tanto con el índice NSF como con el de Dinius, lo cual demuestra que existe una concordancia directa entre los resultados del índice propio con los de los otros índices; demostrándose así que el índice propio puede aplicarse para determinar la calidad del agua del río Tomebamba a futuro e incluso para conocer la calidad de años anteriores, así mismo este índice puede ser aplicado en otros ríos que presenten las características similares al del estudio.

Mediante la ecuación de regresión lineal múltiple se logró calibrar y ajustar la mejor ecuación del modelo, para el cálculo del índice de calidad del agua aplicando el índice propio (AHP), en la que de los 10 parámetros seleccionados todos aportan en significancia al resultado del ICA.

Los resultados obtenidos en el presente permitirán a ETAPA EP tomar decisiones e informar a la ciudadanía la calidad del agua que presenta el río Tomebamba y la importancia de mantenerlo en condiciones aptas tanto para abastecimiento humano como para conservación de la vida acuática.

5.2 Recomendaciones

Referente a la calidad del agua de los ríos que cuenta la región, futuras investigaciones deben determinar la calidad de estos ríos con el fin de tomar las decisiones correctas para conservar estos cuerpos hídricos de acuerdo con la variación de la calidad del agua en un lapso de tiempo.

El presente estudio puede ser complementado con la aplicación de otras metodologías para la determinación de los pesos de los parámetros como es la lógica difusa, métodos como el análisis de componentes principales y el método de peso dinámico objetivo, que al igual que el AHP son metodologías basadas en estadística y por ende dejan a lado la subjetividad (Sutadian et al., 2017).

A pesar de que los resultados de correlación para la validación del índice propio fueron altos con respecto al índice de Dinius y al NSF, se puede aplicar esta correlación con los otros índices como el Oregon y el CCME, ya que estos al igual que el índice propio toman en cuenta la normativa y dan una importancia alta a los coliformes fecales.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, Tasneem, Y S. A. Abbasi. 2012. *Water Quality Indices*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Abtahi, M., Golchinpour, N., Yaghmaeian, K., Rafiee, M., Jahangiri-Rad, M., Keyani, A., & Saeedi, R. (2015). A modified drinking water quality index (DWQI) for assessing drinking source water quality in rural communities of Khuzestan Province, Iran. *Ecological Indicators*, 53, 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.009>
- Akhtar, N., Ishak, M. I. S., Ahmad, M. I., Umar, K., Md Yusuff, M. S., Anees, M. T., Qadir, A., & Almanasir, Y. K. A. (2021). Modification of the water quality index (Wqi) process for simple calculation using the multi-criteria decision-making (mcdm) method: A review. *Water (Switzerland)*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/w13070905>
- Akter, T., Jhohura, F. T., Akter, F., Chowdhury, T. R., Mistry, S. K., Dey, D., Barua, M. K., Islam, M. A., & Rahman, M. (2016). Water Quality Index for measuring drinking water quality in rural Bangladesh: A crosssectional study. *Journal of Health, Population and Nutrition*, 35(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s41043-016-0041-5>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). Constitución de la República del Ecuador. *Iusrectusecart*, 449, 1–219. <https://bde.fin.ec/wp-content/uploads/2021/02/Constitucionultimodif25enero2021.pdf>
- Brown, D. (2017). Oregon Water Quality Index Data Summary. *Oregon Department of Environmental Quality Laboratory and Environmental Assessment Program*, 2016, 6. <http://www.deq.state.or.us/lab/wqm/wqimain.htm>
- Caho, C. A., & López, E. A. (2017). Determination of the water quality index for the western section of the Torca- Guaymaral wetland using UWQI and CWQI methodologies. *Producción + Limpia*, 12(2), 35–49. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3>
- Camacho, J. (2008). Asociación entre variables cuantitativas: análisis de correlación. *Acta Médica Costarricense*, 50(2), 94–96. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-60022008000200005&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Carrasco, M. C., Pineda, R., & Pérez, M. R. (2010). Calidad del habitat en los rios tomebanba y yanuncay en Ecuador. *Cienca@UAQ*, 3(2), 13–26.
- Carrillo, E. M., & Lozano, A. M. (2008). Validación Del Método De Detección De Coliformes Totales Y Fecales En Agua Potable Utilizando Agar Chromocult. *Revista de Trabajo Social*,

- 11(75), 23–26.
http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/Informe_de_Desarrollo_Social_2020.pdf
<http://revistas.ucm.es/index.php/CUTS/article/view/44540/44554>
- Castillejo, H. (2002). El Proceso Analítico Fundamentos Jerárquico (Ahp). Metodología Y Aplicaciones. *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1, 28–77.
- Chakraborty, S., & Kumar, R. N. (2016). Assessment of groundwater quality at a MSW landfill site using standard and AHP based water quality index: a case study from Ranchi, Jharkhand, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(6).
<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5336-x>
- Cocha, J. (2009). Estado Actual De La Calidad Físico-Química, Bacteriológica Y Biológica Del Agua De La Subcuenca Del Río Yanuncay En Dos Estaciones Climáticas (Invierno Y Verano) Del Cantón Cuenca Provincia Del Azuay-Ecuador. *Diplomado Superior En Educación Universitaria Por Competencias*, 104.
<http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3281/1/10055.pdf>
- Delgado, M. J., & Camargo, M. G. (2013). UNIVERSIDAD DE CUENCA - TESIS.pdf. *Artículo Ecuador*, 1(5), 1–127.
- Dinius, S. H. (1987). Design of an Index of Water Quality. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 23(5), 833–843. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1987.tb02959.x>
- Dojlido, J. A. N., Raniszewski, J., & Woyciechowska, J. (1994). Water Quality Index Applied To Rivers In The Vistula mg / l. *Environmental Monitoring and Assessment*, July 1993, 33–42.
- Fernández, M. T. (2017). Determinación de coliformes totales y fecales en aguas de uso tecnológico para las centrífugas. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 51(2), 70–73.
- Forero, A. M., Reinoso, G., & Gutiérrez, C. (2013). *Water quality assessment of the Opia River (Tolima-Colombia), using macroinvertebrates and physicochemical parameters*.
<https://www.jstor.org/stable/10.2307/90008350>
- Forman, E., & Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 108(1), 165–169.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00244-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00244-0)

- GADM-CUENCA. (2015). Actualización Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Cantón Cuenca. *GADM de CUENCA*, 981. https://www.academia.edu/27357890/Plan_De_Development_Y_Ordering_Territorial_Del_Canton_Cuenca
- Galaviz, I., & Sosa, C. A. (2019). Diffuse sources and Punctual Pollution. Quality of Surface and Groundwater. In *Diffuse sources and Punctual Pollution. Quality of Surface and Groundwater* (Issue November). <https://doi.org/10.26359/epomex0719>
- García, A., Reyes, M. G., Alvarado, A. I., González, L. S., Magdalena, D., Vázquez, E. del C., Estaban, M., Quintos, M., & Herrera, A. (2009). Cloruros totales en el agua de abastecimiento. *Centro Interdisciplinario de Investigación Para El Desarrollo Integral Regional.*, 3. <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8825/1/clorurosnov12.pdf>
- Gonzalez, S. (2007). Contaminación Difusa De Las Aguas Continentales. *Agricultura Limpia*, figura 2, 10–17.
- González, V., Caicedo, O., & Aguirre, N. (2013). Application of water quality indices NSF, DINIUS and BMWP to Ayurá Creek, Antioquia, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 16(1), 97–107.
- Gualdrón, L. E. (2016). “Evaluación De La Calidad De Agua De Ríos De Colombia Usando Parámetros Físicoquímicos Y Biológicos.” https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/20335/CD_EGA_2016_0006_Trabajo_de_grado.pdf?sequence=1
- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J. M., & Fernandez, L. (2000). Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research*, 34(3), 807–816. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00225-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00225-0)
- Inamdar P. (2014). Selection and Evaluation of Potential Stormwater Harvesting Sites in Urban Areas. *PhD Thesis*.
- Iqbal, M. M., Shoaib, M., Farid, H. U., & Lee, J. L. (2018). Assessment of water quality profile using numerical modeling approach in major climate classes of asia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2258). <https://doi.org/10.3390/ijerph15102258>

- Jahan, S., & Strezov, V. (2017). Water quality assessment of Australian ports using water quality evaluation indices. *PLOS ONE*, 12(12), 1–15.
- Lalinde, H., Diego, J., Castro, E., Johel, E., Rangel, C., Sierra, T., Andrés, C., Torrado, A., Karina, M., Sierra, C., Milena, S., Diego, J., Lalinde, H., & Castro, F. E. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5), 587–595.
- Machado, A. E., & Toasa, F. A. (2012). Validacion De Los Metodos De Ensayo Para Fenoles, Tensoactivos, Solidos Suspendidos Y Total De Solidos Disueltos (TDS). In *Quito: UCE*.
- Mondragón, M. (2014). Use Of The Correlation Spearman In A Study Of Intervention In Physiotherapy. *Movimiento Científico*, 8(1), 98–1047.
- Nasiri, F., Maqsood, I., Huang, G., & Fuller, N. (2007). Water Quality Index: A Fuzzy River-Pollution Decision Support Expert System. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(2), 95–105. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2007\)133:2\(95\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2007)133:2(95))
- Pacheco, D. A., & Quiroz, J. D. (2021). *Evaluación de la condición del río Migüir mediante el desarrollo de un índice de calidad de agua*.
- Pauta, G., & Chang, J. (2014). Indices de calidad del agua de fuentes superficiales y aspectos toxicológicos, evaluación del Río Burgay. *Maskana*, 5, 165–176.
- Pauta, G., Velasco, M., Gutiérrez, D., Vázquez, G., Rivera, S., Morales, Ó., & Abril, A. (2019). Evaluación de la calidad del agua de los ríos de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *Maskana*, 10(2), 76–88. <https://doi.org/10.18537/mskn.10.02.08>
- Pérez, J. I., Nardini, A. G., & Galindo, A. A. (2018). Comparative analysis of water quality indices applied to the ranchería river, la guajira-Colombia. *Informacion Tecnologica*, 29(3), 47–58. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300047>
- Pesántez, M. K., & Roldán, A. P. (2021). *Relación De La Calidad Del Agua De La Quebrada El Salado Con El Uso De Suelo Urbano Y Periurbano De La Parroquia Baños (bachelorThesis)*. Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/36142>
- Restrepo, L., & Gonzáles, J. (2007). From Pearson to Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183–192. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-06902007000200010

- Saaty. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. (2012). The seven pillars of the analytic hierarchy process. *International Series in Operations Research and Management Science*, 175, 23–40. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6_2
- Sarkar, C., & Abbasi, S. A. (2006). QUALIDEX – A NEW SOFTWARE FOR GENERATING WATER. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119, 201–231. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9023-6>
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Segarra, J. (2016). Impacto Del Cambio Del Uso De Suelo Sobre La Calidad Del Agua Del Rio Tomebamba. *Diplomado Superior En Educación Universitaria Por Competencias*, 104. <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3281/1/10055.pdf>
- Şener, Ş., Şener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 584–585, 131–144. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.102>
- Shen, L., Muduli, K., & Barve, A. (2015). Developing a sustainable development framework in the context of mining industries: AHP approach. *Resources Policy*, 46, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.10.006>
- Sierra, C. A. (2011). Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Sigler, A., & Bauder, J. (2017). Alcalinidad , pH , y Sólidos Disueltos Totales. *Northern Plains & Mountains*, 20, 1. http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS_2012-11-15-SP.pdf
- Singh, P. ., & Saxena, S. (2018). Towards developing a river health index. *Ecological Indicators*, 85(December 2017), 999–1011. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.059>
- Solangi, G. S., Siyal, A. A., Babar, M. M., & Siyal, P. (2018). Evaluation of surface water quality using the water quality index (Wqi) and the synthetic pollution index (spi): A case study of

- indus delta region of pakistan. *Desalination and Water Treatment*, 118, 39–48. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22407>
- Sosa, G. (2016). *Componentes de la gestión del agua para consumo humano en el Municipio de Valle de Ángeles , Honduras Magister Scientiae en Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas Gabriel Sosa Pérez Turrialba , Costa Rica , 2007. December 2007.*
- Sutadian, Muttill, N., Gokhan, A., & Perera. (2018). Development of a water quality index for rivers in West Java Province, Indonesia. *Ecological Indicators*, 85, 966–982. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.049>
- Sutadian, Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2017). Using the Analytic Hierarchy Process to identify parameter weights for developing a water quality index. *Ecological Indicators*, 75, 220–233. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.043>
- Tomas, D., Čurlin, M., & Marić, A. S. (2017). Assessing the surface water status in Pannonian ecoregion by the water quality index model. *Ecological Indicators*, 79, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.033>
- Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. (2009). Índices De Calidad De Agua En Fuentes Superficiales Utilizadas En La Producción De Agua Para Consumo Humano. Una Revisión Crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79–94. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4845739>
- Torrez, C. A. (2018). Planteamiento De Una Metodología Para El Cálculo De Un Índice De Calidad Del Agua Para El Río Machángara, Cuenca Alta Del Río Guayllabamba. In *Escuela Politécnica Nacional Facultad De Ingeniería Civil Y Ambiental*.
- Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
- Valentini, M., Dos Santos, G. B., & Muller Vieira, B. (2021). Multiple linear regression analysis (MLR) applied for modeling a new WQI equation for monitoring the water quality of Mirim Lagoon, in the state of Rio Grande do Sul—Brazil. *SN Applied Sciences*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04005-1>
- Yussac Tallar, R., & Suen, J. (2015). Aquaculture Water Quality Index : a low-cost index to accelerate aquaculture development in Indonesia. *Aquaculture International*, 1. <https://doi.org/10.1007/s10499-015-9926-3>

ANEXOS

Anexo I: tabla 1 (Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional)

TABLA 1: CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUAS QUE PARA CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO QUE REQUIEREN TRATAMIENTO CONVENCIONAL			
PARÁMETRO	EXPRESADO COMO	UNIDAD	CRITERIO DE CALIDAD
Aceites y Grasas	Película visible		Ausencia
Aluminio total	Al	mg/l	0,2
Amoníaco	N	mg/l	0,5
Arsénico	As	mg/l	0,1
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	2000
Coliformes Totales	NMP	NMP/100 ml	20000
Bario	Ba	mg/l	1,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,01
Cianuro	CN ⁻	mg/l	0,2
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Color	Color real	Unidades de Platino-Cobalto	75,0
Compuesto Fenólicos	Fenol	mg/l	0,001
Cromo	Cr ⁺⁶	mg/l	0,05
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	<2mg/l
Hierro total	Fe	mg/l	1,0
Difeniles Policlorinados	Concentración de agente activo		No detectable
Materia Flotante	Visible		Ausencia
Mercurio	Hg	mg/l	0,002
Nitratos	N	mg/l	10,0
Nitritos	N	mg/l	1,0
Olor y sabor			Es permitido removible por tratamiento convencional
Oxígeno Disuelto	OD	mg/l	>60% del OD Sat.
pH	pH		6-9
Plata	Ag	mg/l	0,05
Plomo	Pb	mg/l	0,05
Selenio	Se	mg/l	0,01
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	250,0
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Turbiedad		UTN	100,0

Nota: Podrán usarse aguas con turbiedades y coliformes fecales ocasionales superiores a los indicados en esta Tabla, siempre y las características de las aguas tratadas sean entregadas de acuerdo con la Norma INEN

Anexo 2: tabla 2 (Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requieran desinfección)

TABLA 2: CRITERIOS DE CALIDAD PARA LAS AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO Y QUE PARA SU POTABILIZACIÓN SOLO REQUIEREN DESINFECCIÓN			
PARÁMETRO	EXPRESADO COMO	UNIDAD	CRITERIO DE CALIDAD
Aceites y grasas	Película visible		Ausencia
Aluminio total	Al	mg/l	0,1
Amoníaco	N	mg/l	0,05
Arsénico	As	mg/l	0,018
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100ml	20
Coliformes Totales	NMP	NMP/100ml	200
Bario	Ba	mg/l	1,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,01
Cianuro	CN ⁻	mg/l	0,2
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	250,0
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Color	Color real	Unidades de Pt-Co	20,0
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,001
Cromo	Cr ⁺⁶	mg/l	0,05
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	<2mg/l
Difeniles policlorinados	Concentración de agente reactivo	mg/l	No detectable
Hierro total	Fe	mg/l	0,3
Materia flotante	Visible		Ausencia
Mercurio	Hg	mg/l	0,002
Nitratos	N	mg/l	10,0
Nitritos	N	mg/l	1,0
Olor y sabor			Ausencia
Oxígeno Disuelto	OD	mg/l	>75% del OD Sat.
pH		pH	6-9
Plata	Ag	mg/l	0,05
Plomo	Pb	mg/l	0,05
Selenio	Se	mg/l	0,01
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	250
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Turbiedad		UTN	10,0

Nota: Podrán usarse aguas con turbiedades y coliformes fecales ocasionales superiores a los indicados en esta Tabla, siempre y las características de las aguas tratadas sean entregadas de acuerdo con la Norma INEN

Anexo 3: tablas de los parámetros que se utilizan para el cálculo del índice NSF, comprada con la normativa (Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional)

Tabla 43: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte alta

Estación: TOM – QN – 015															
Parte Alta															
Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT-PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2013	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2014	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2018	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2019	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-

Elaboración: Autor 2022

Tabla 44: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte alta

Estación: TOM – QN – 005															
Parte Alta															
Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT-PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2014	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2018	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2019	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-

Elaboración: Autor 2022

Tabla 45: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte media

Estación: TOM – TOM – 005

Parte Media

Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT-PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2013	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2014	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2018	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2019	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-

Elaboración: Autor 2022

Tabla 46: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte media

Estación: TOM – CU – CONTROL															
Parte Media															
Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT-PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2013	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2014	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2018	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2019	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-

Elaboración: Autor 2022

Tabla 47: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte baja

Estación: TOM – TOM – 050

Parte Baja

Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT-PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2013	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2014	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2018	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2019	Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-

Elaboración: Autor 2022

Tabla 48: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte baja

Estación: TOM – MIL – CONTROL															
Parte Baja															
Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT-PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	No Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2013	No Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2014	No Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2018	No Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2019	No Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-

Elaboración: Autor 2022

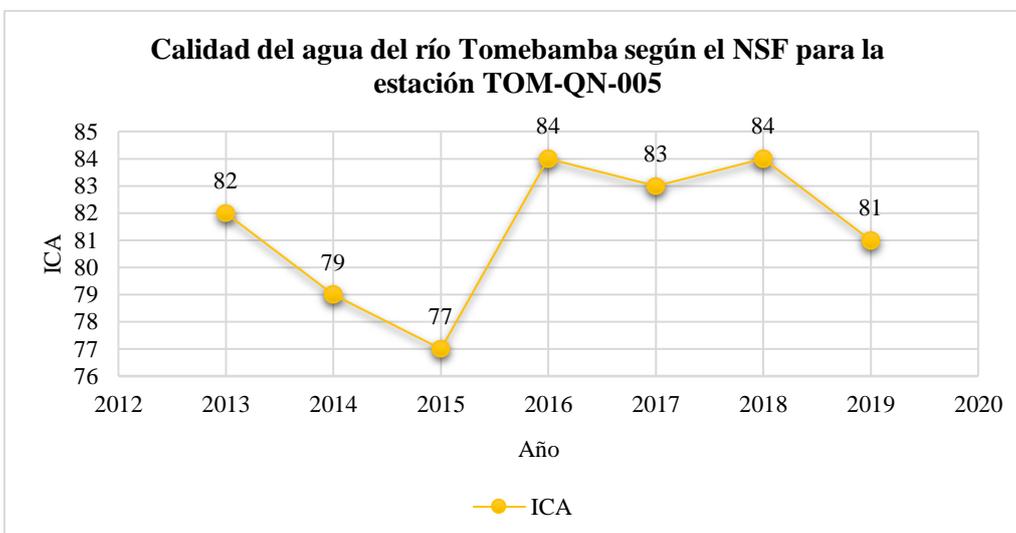
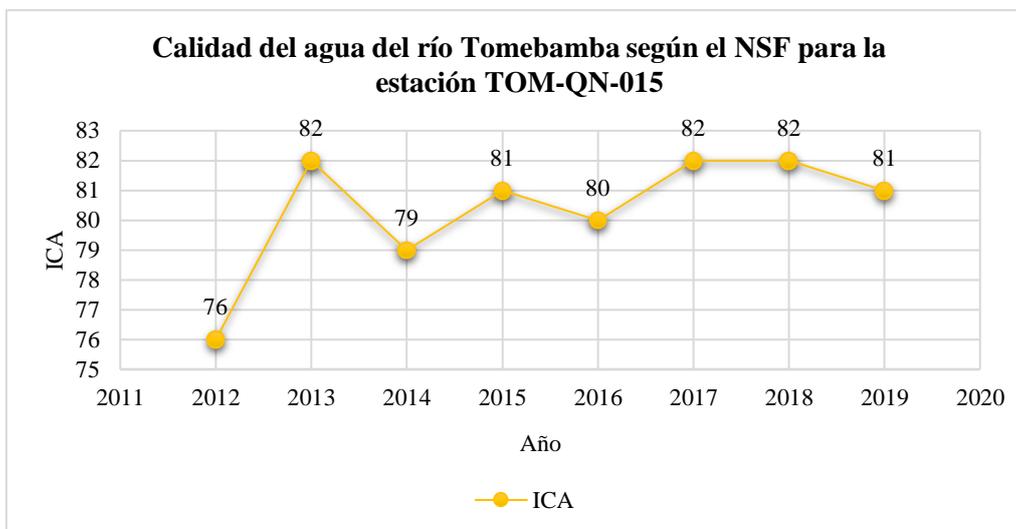
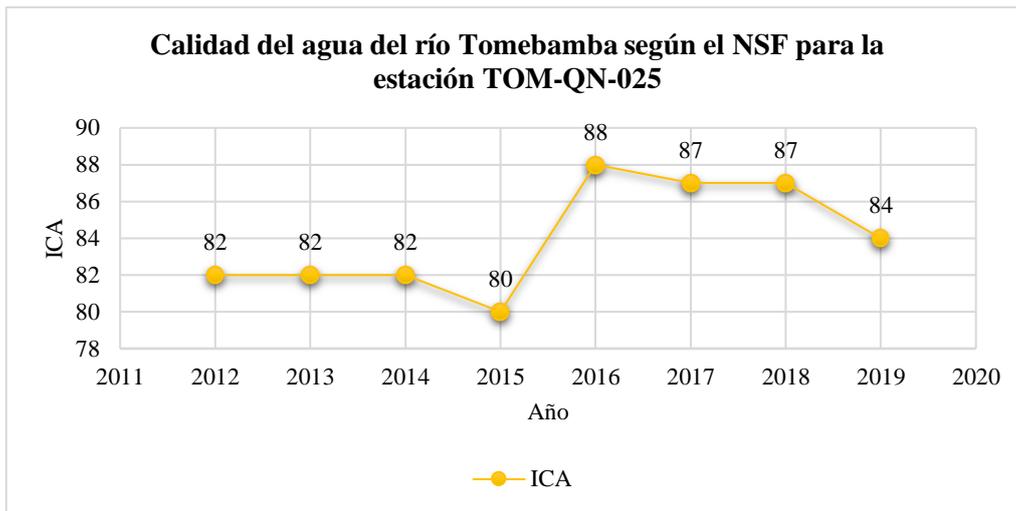
Tabla 49: Parámetros utilizados para el cálculo de los diferentes índices, estación de la parte baja

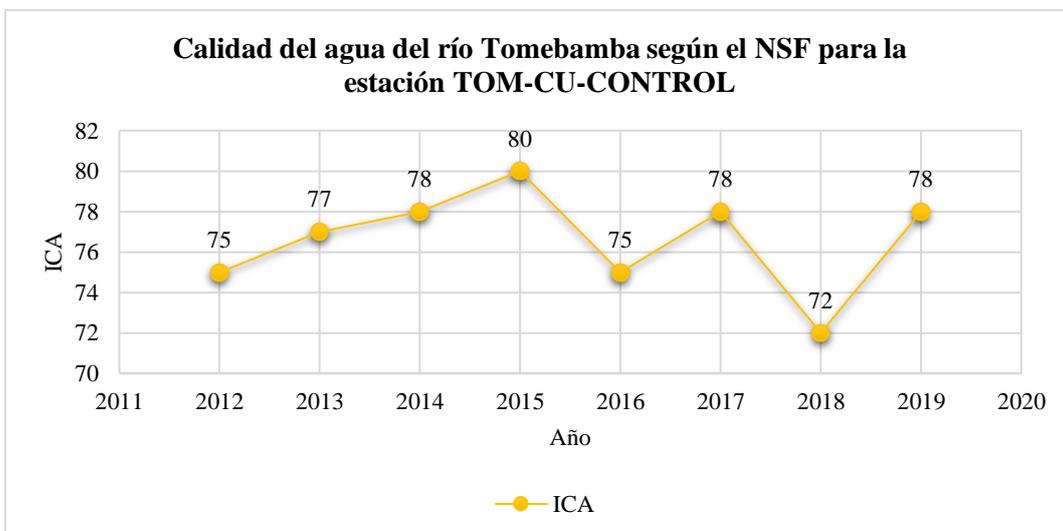
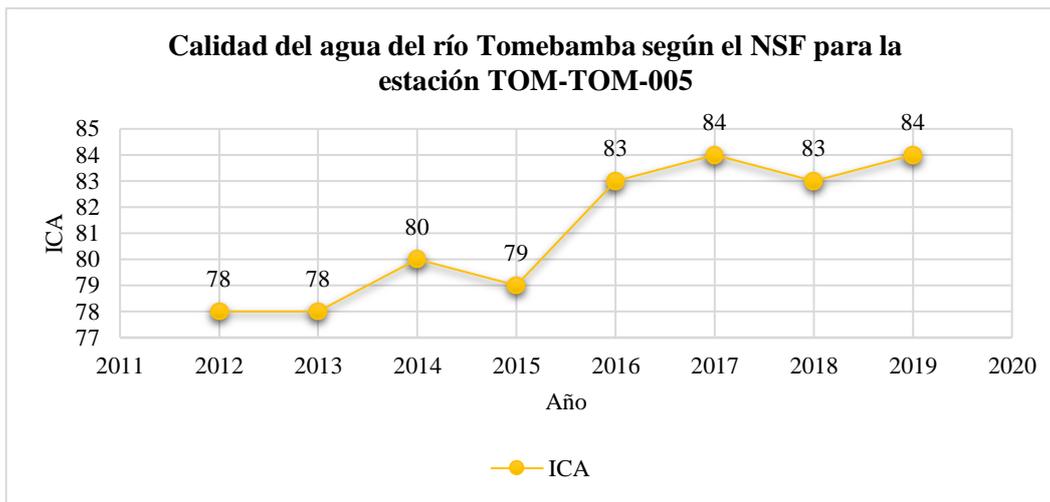
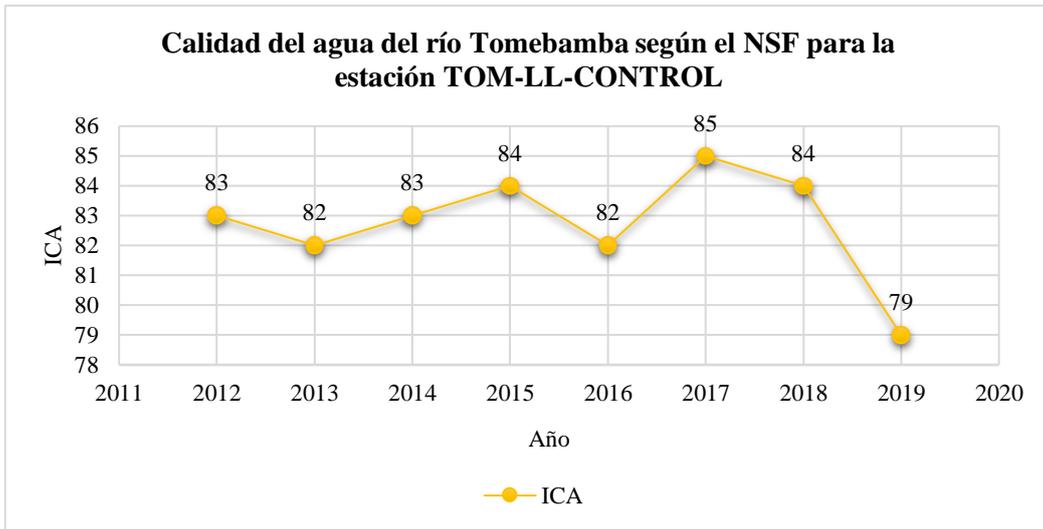
Estación: TOM – TOM – CONTROL
Parte Baja

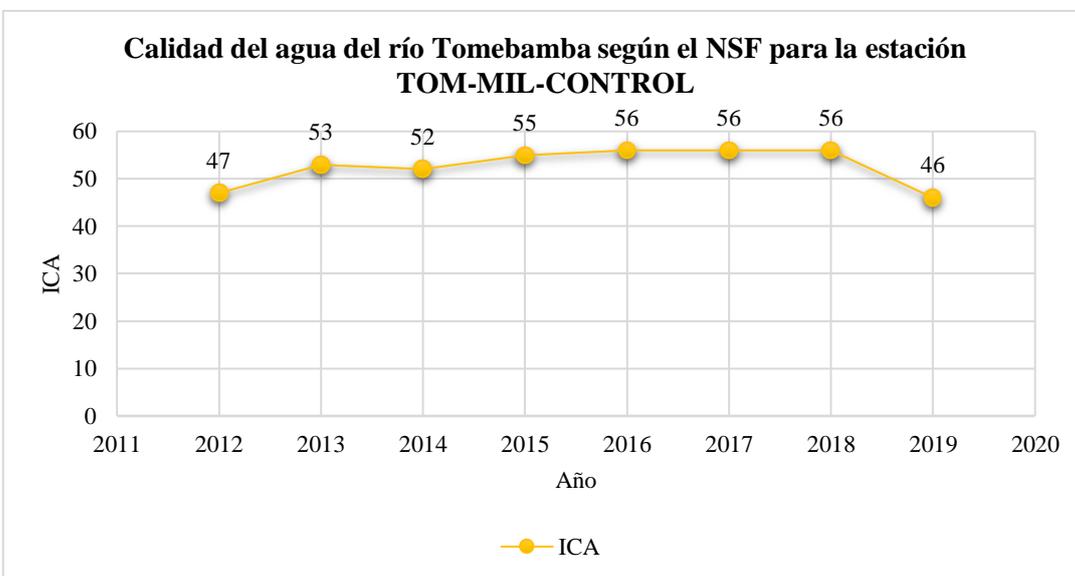
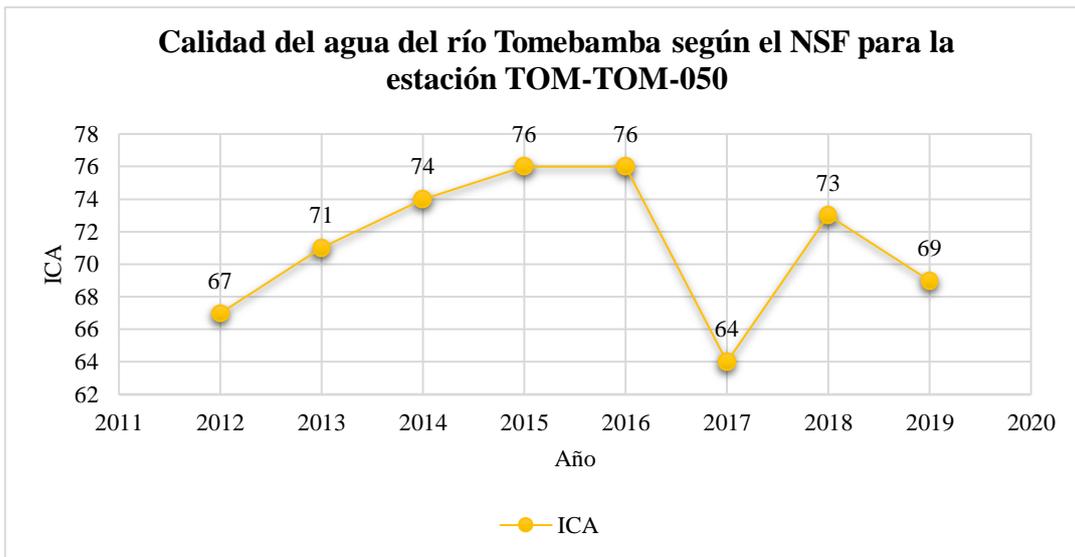
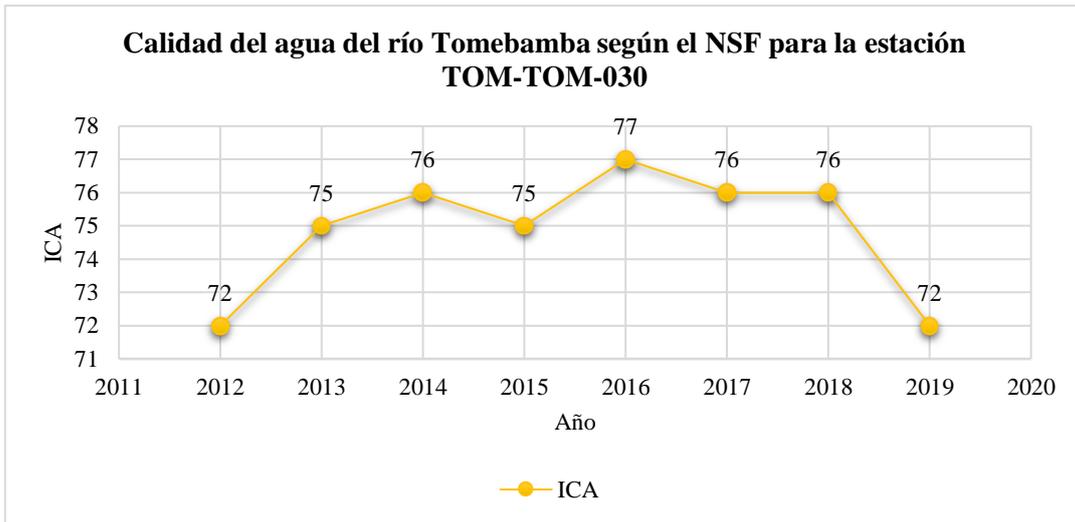
Año	% OD	CF (NMP/100ml)	pH	DBO ₅ (mg/L)	T °C	PT-PO ₄ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Turb (NTU)	ST (mg/L)	CT (NMP/100ml)	Col (UC)	CE (us/cm)	D (mg CaCO ₃ /l)	Alc	P (mg/l)
Valor de la Normativa (TULSMA)	Mayor a 80%	600	6-9	2.0	-	-	-	100	1000	3000	100	-	500	-	-
2012	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2013	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2014	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2015	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2016	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2017	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-
2018	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	-	Cumple	-	-
2019	Cumple	No Cumple	Cumple	No Cumple	-	-	-	Cumple	Cumple	No Cumple	No Cumple	-	Cumple	-	-

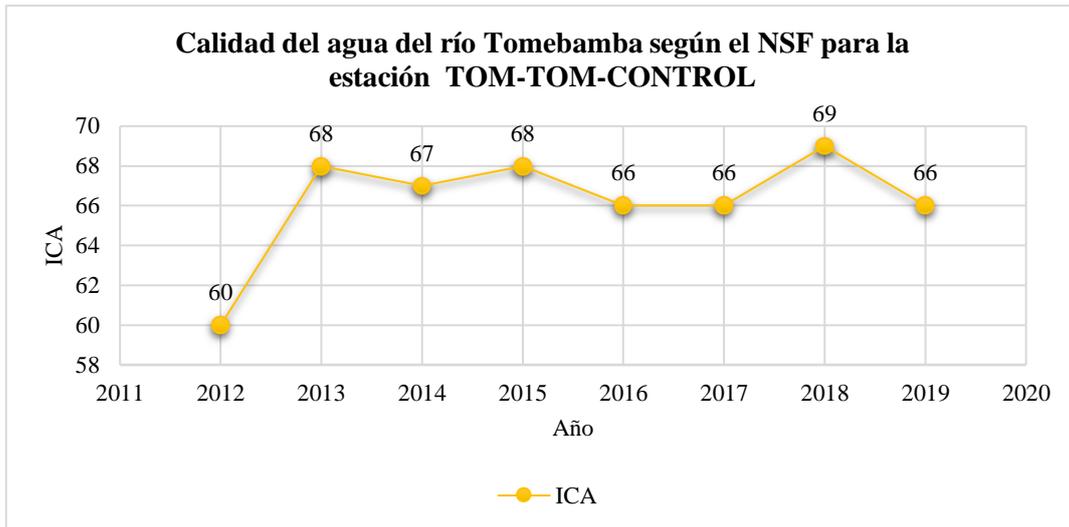
Elaboración: Autor 2022

Anexo 4: Representación gráfica de la variación del índice de calidad del agua de acuerdo a los resultados obtenidos aplicando en índice NSF.

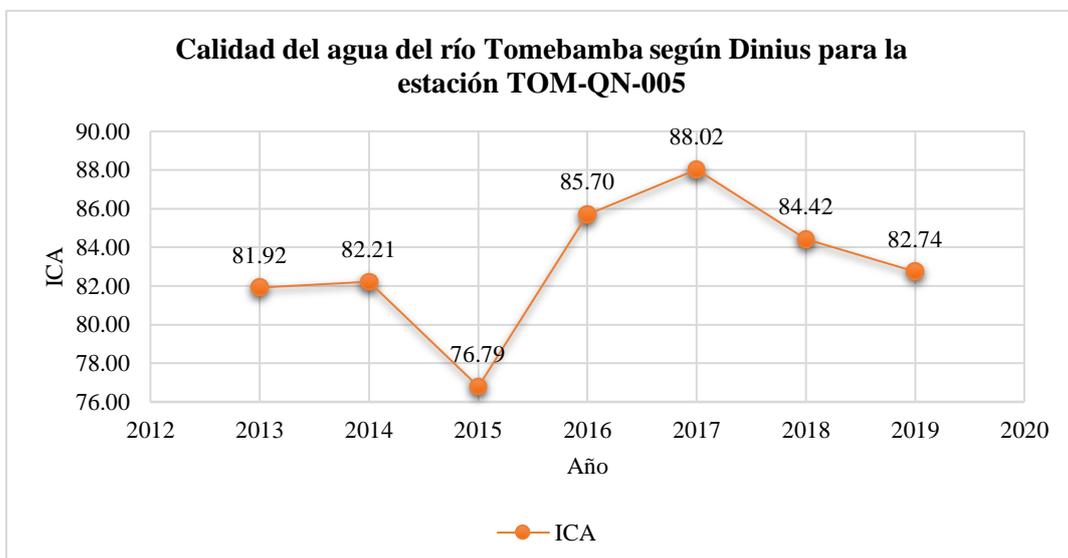
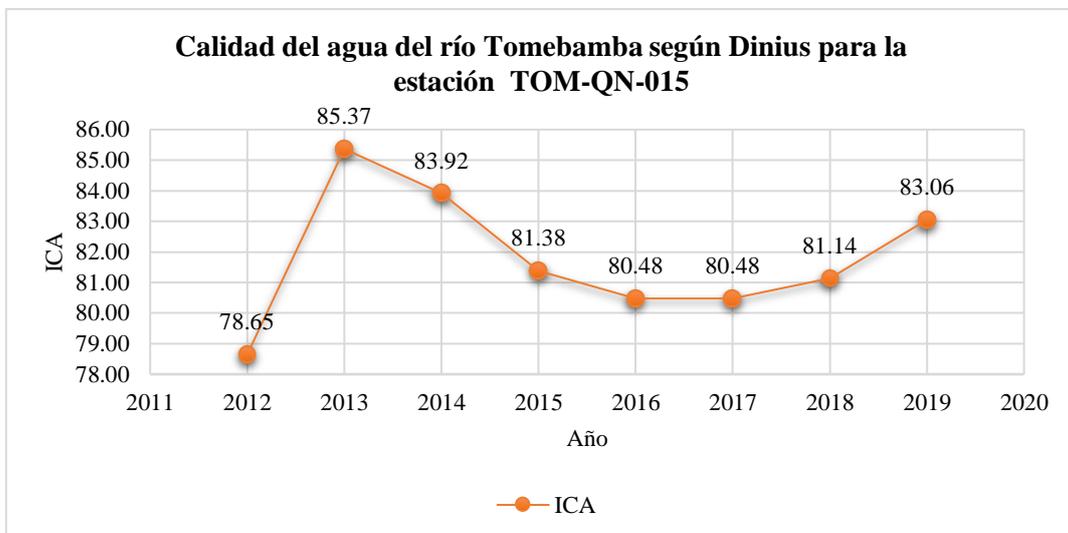
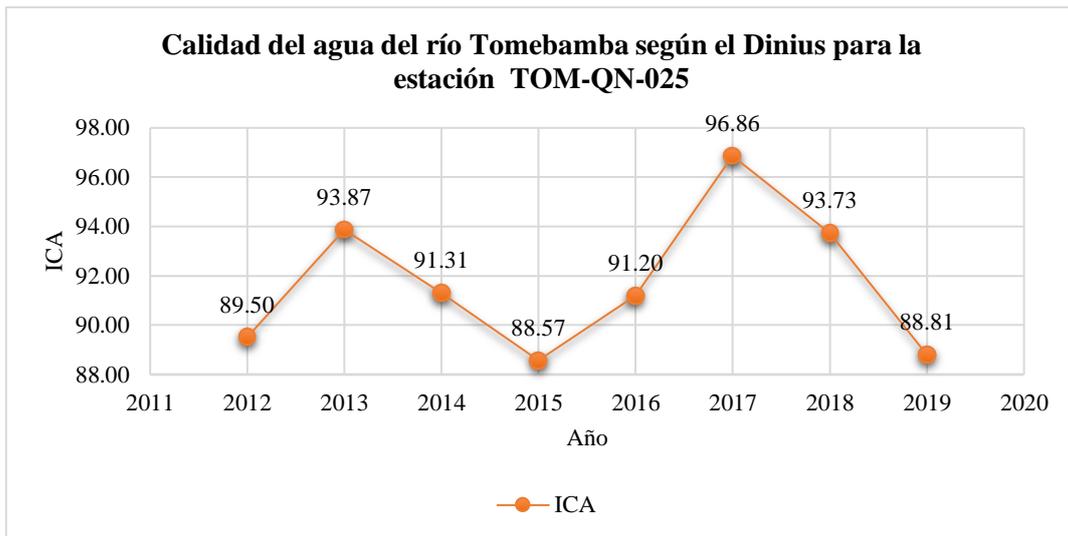


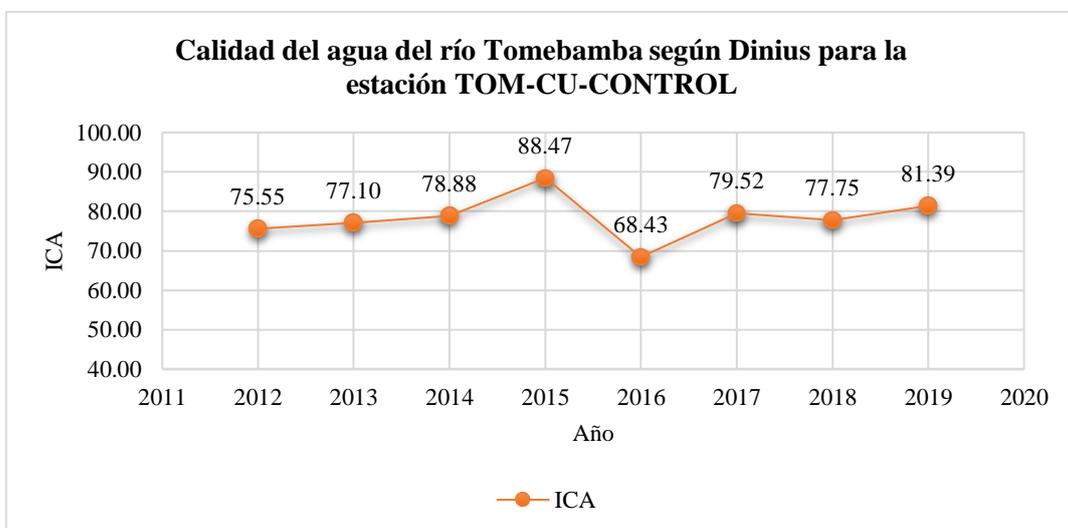
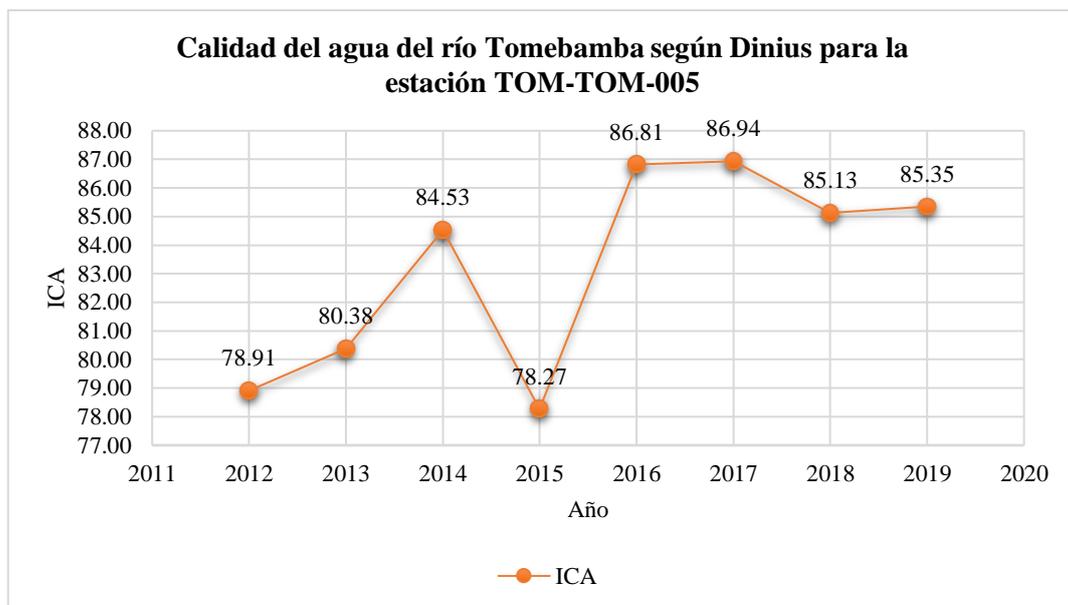
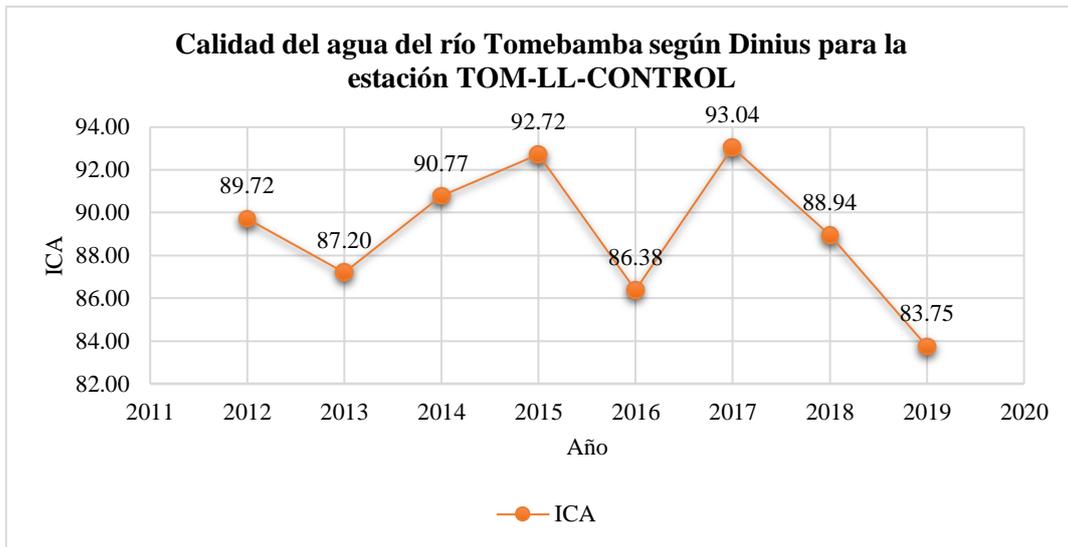


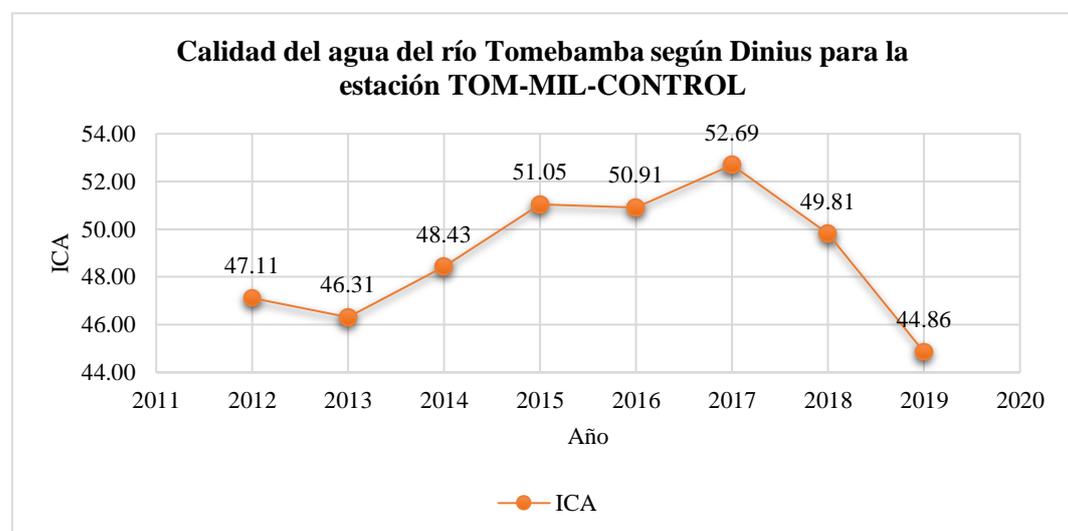
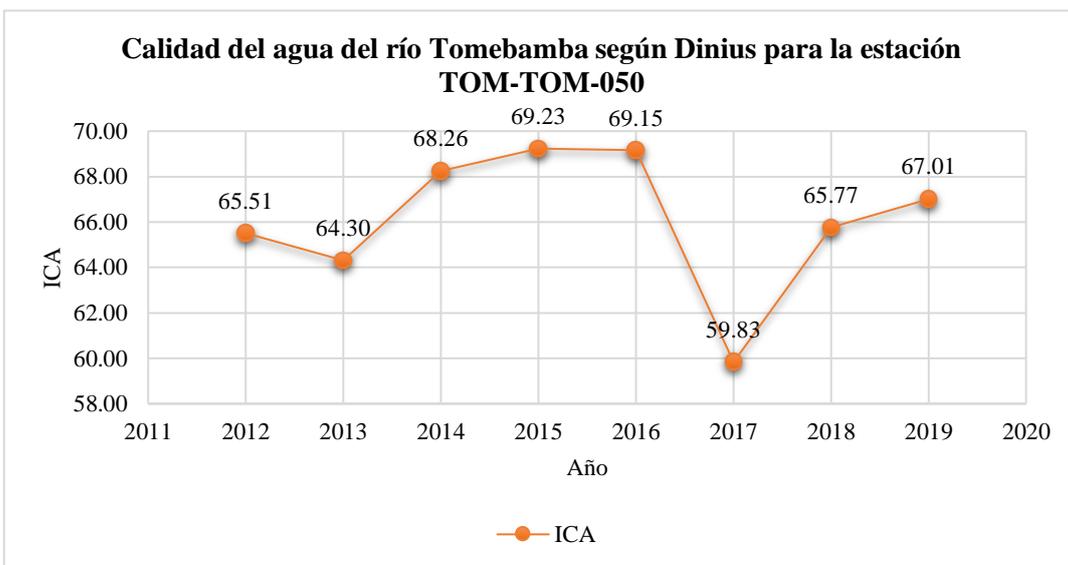
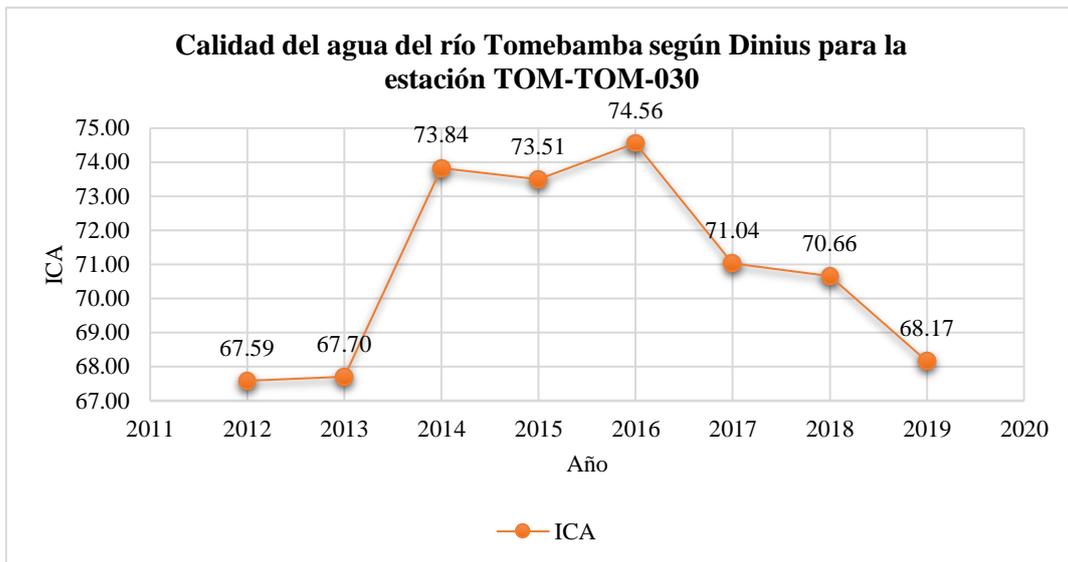


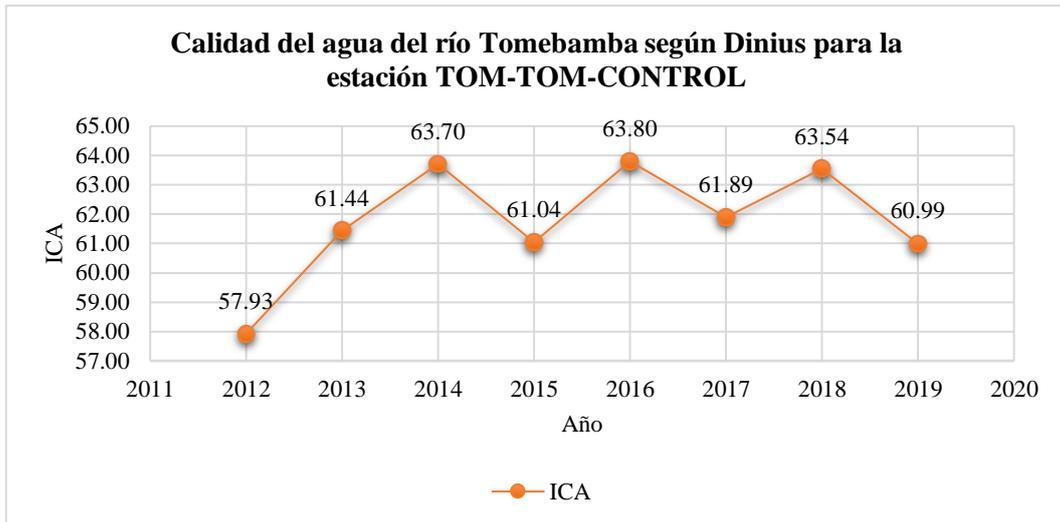


Anexo 5: Representación gráfica de la variación del índice de calidad del agua de acuerdo a los resultados obtenidos aplicando en índice de Dinius.

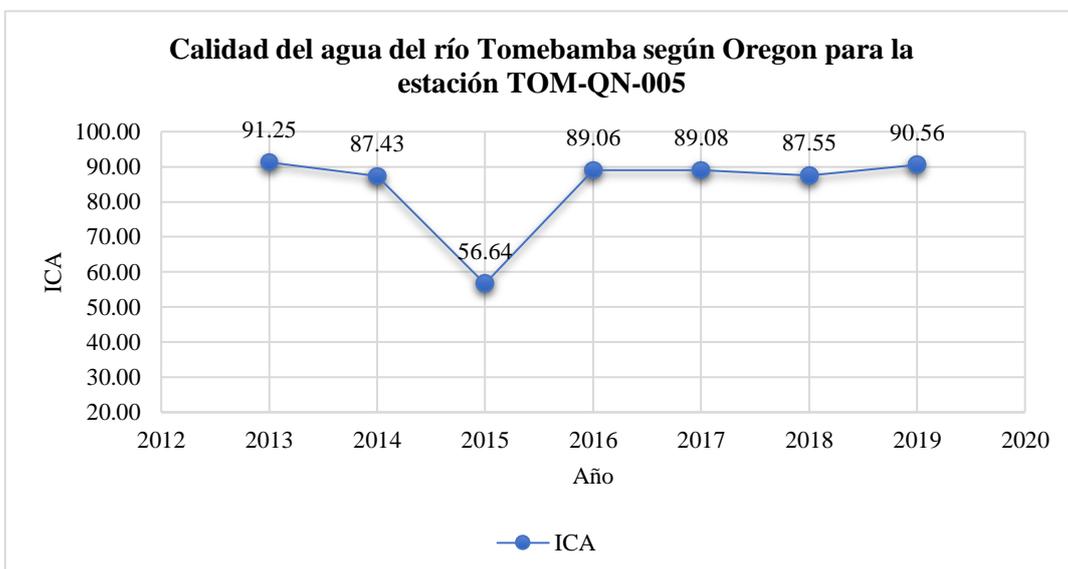
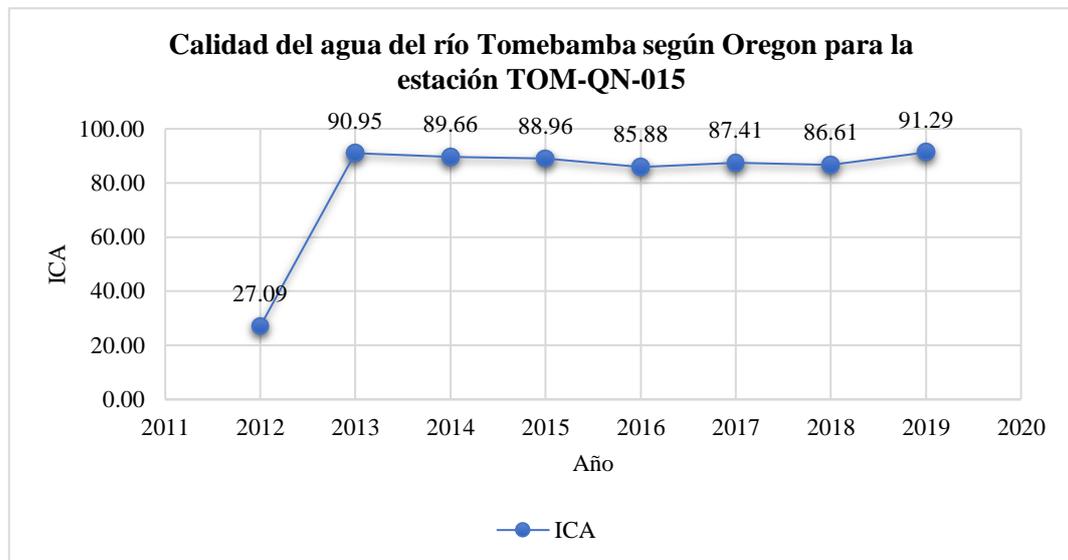
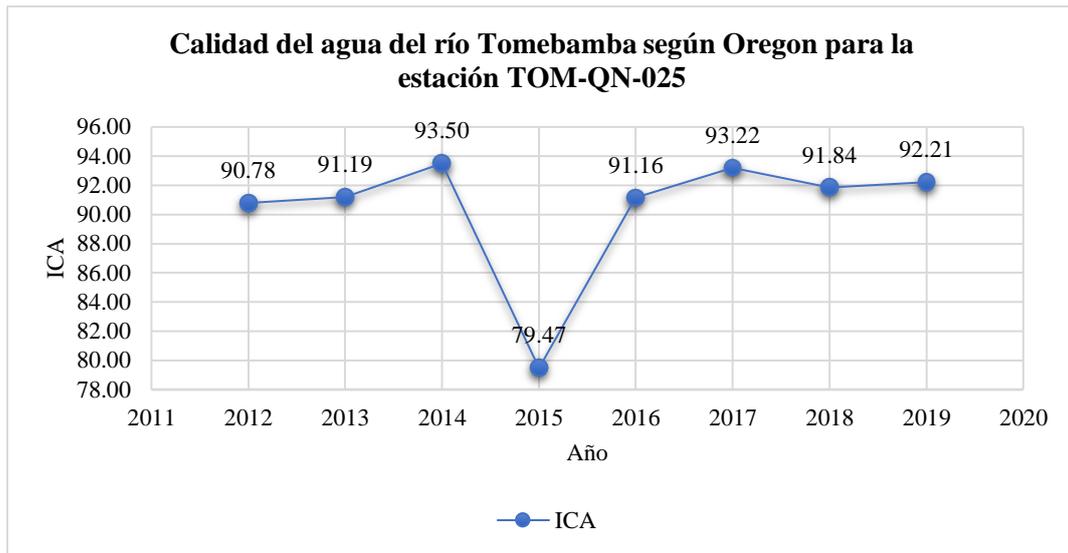


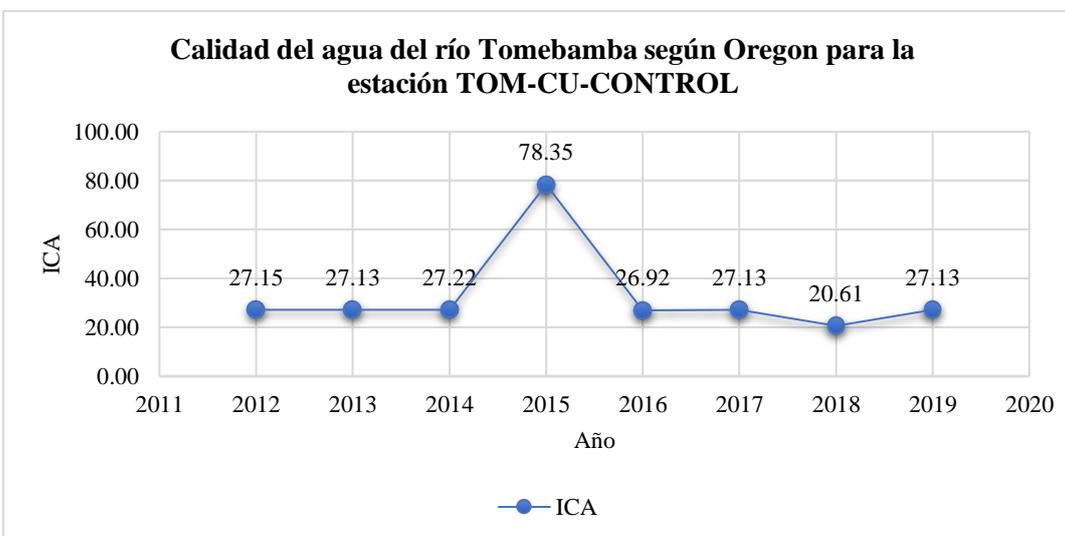
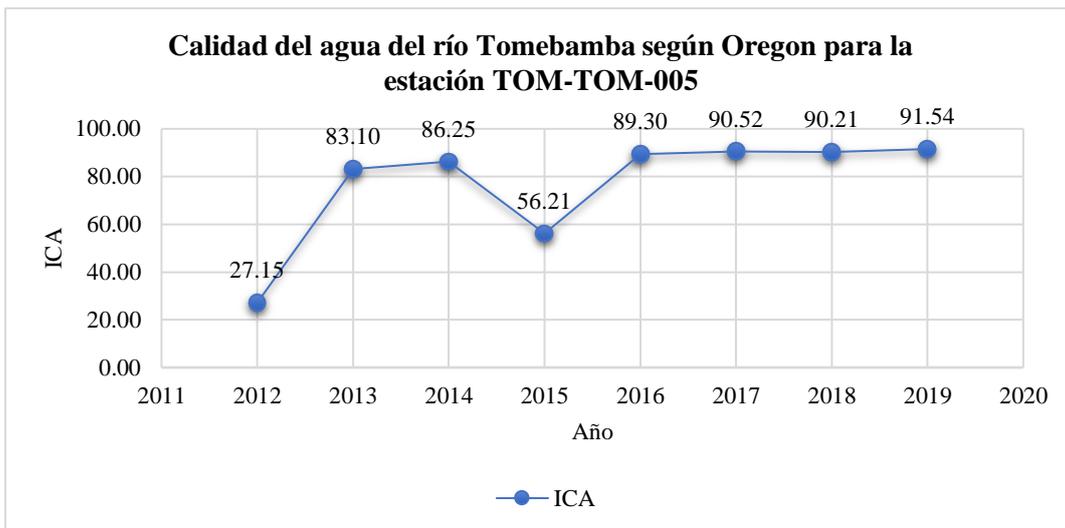
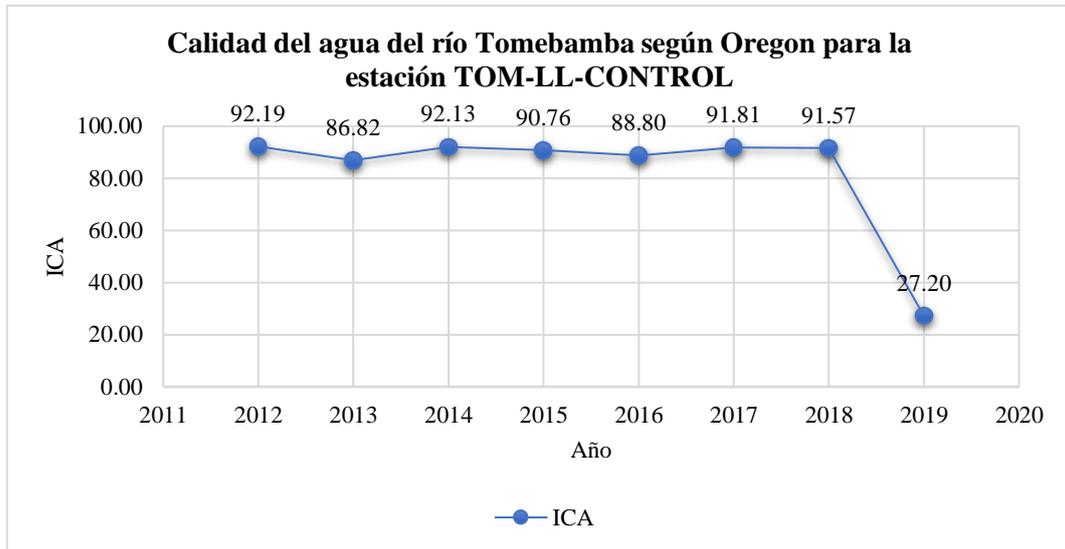


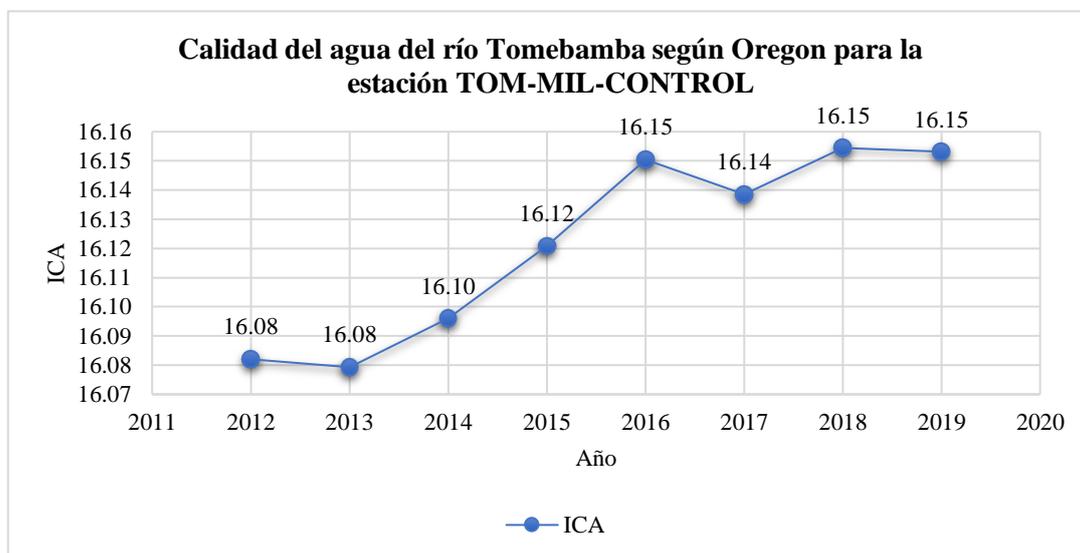
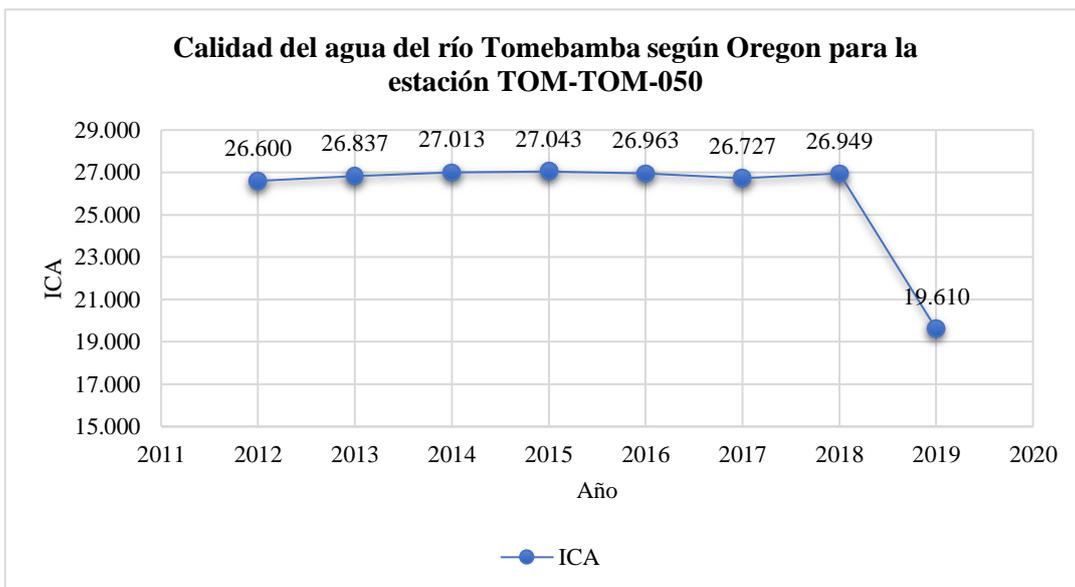
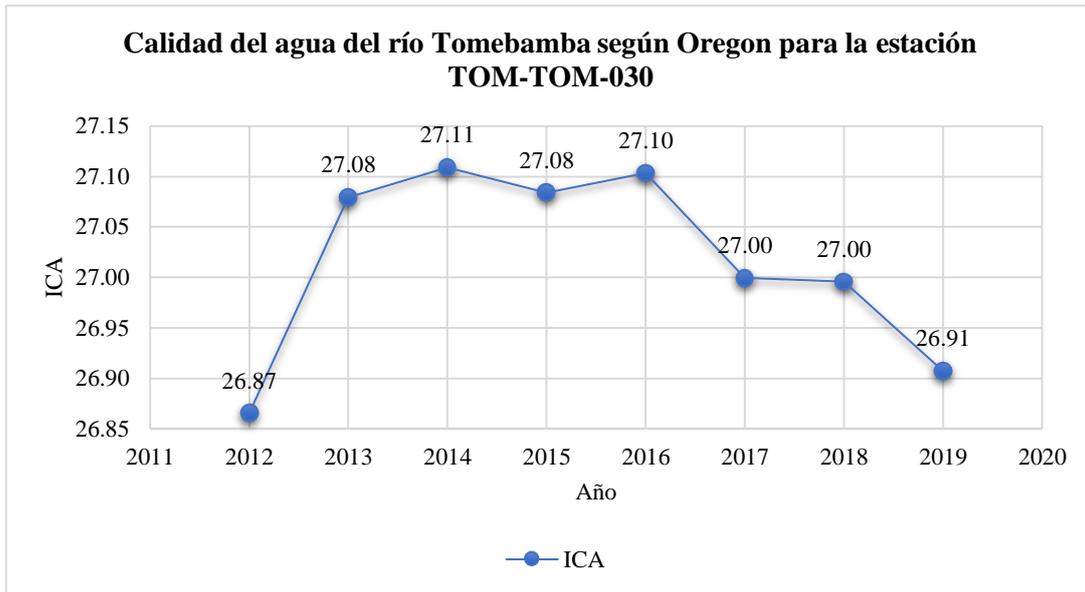


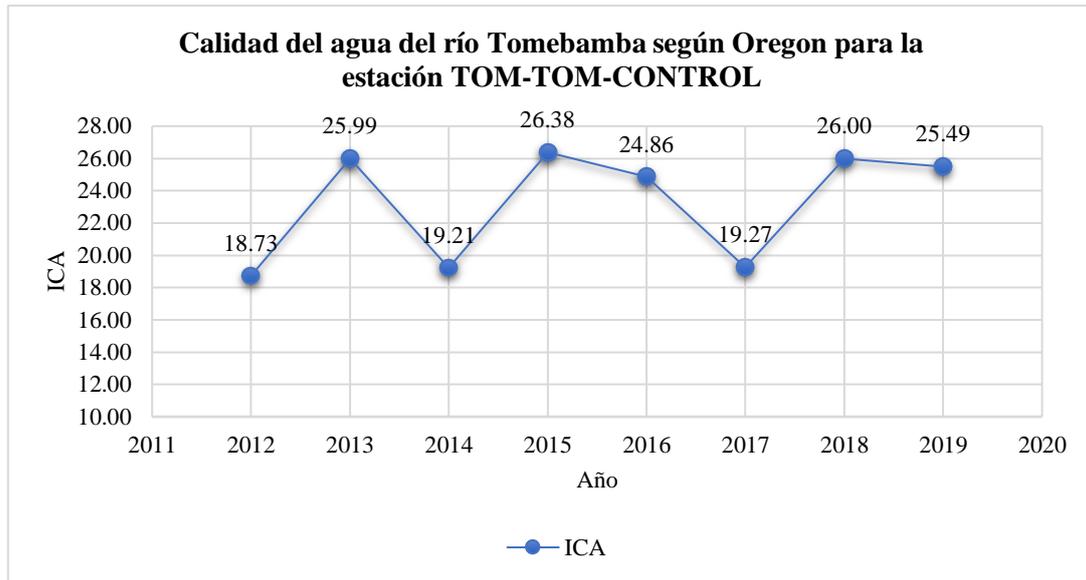


Anexo 6: Representación gráfica de la variación del índice de calidad del agua de acuerdo a los resultados obtenidos aplicando en índice de Oregon.





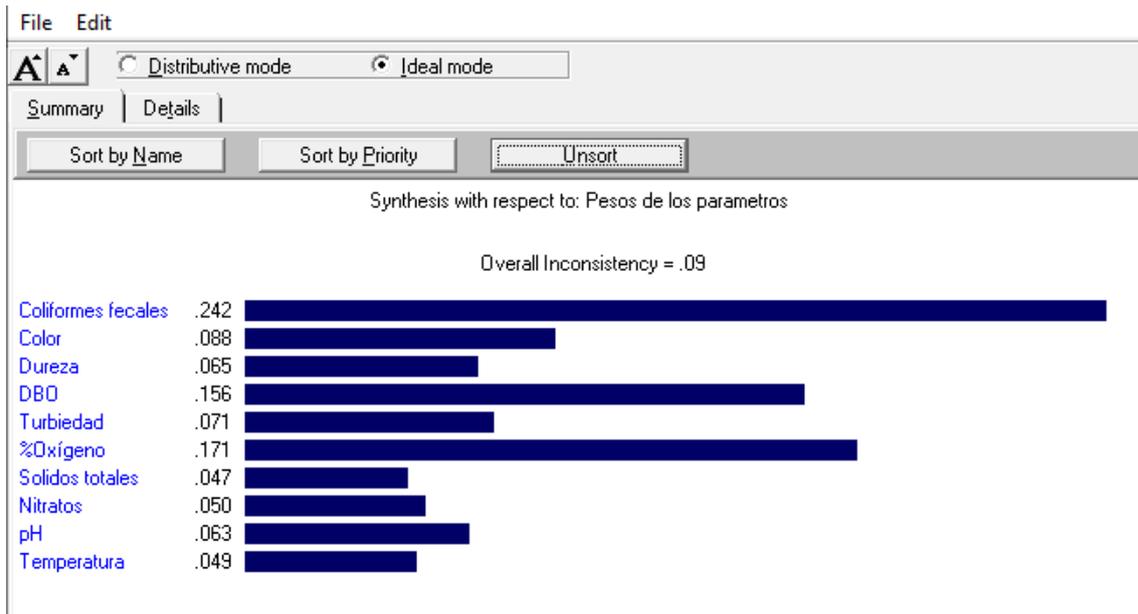




Anexo 7: Representación del llenado de la matriz de comparación por pares (ejemplo del grupo 1)

<i>Matriz para la comparación por pares (deben llenar únicamente la parte superior color amarillo)</i>										
Parametros	Coliformes Fecales	Color aparente	Dureza	DBO	Turbiedad	% Oxígeno disuelto	Solidos Total	Nitratos	pH	Temperatura
Coliformes Fecales	1	7	8	1	4	1	4	4	3	3
Color aparente		1	3	1	1	1	1	1	1	1
Dureza			1	1	1	1	1	1	1	1
DBO				1	5	1	3	4	3	3
Turbiedad					1	1	2	1	1	2
% Oxígeno disuelto						1	8	7	4	3
Solidos Total							1	1	1	1
Nitratos								1	1	1
pH									1	3
Temperatura										1

Anexo 8: Ejemplo de la obtención de pesos individuales de la comparación por pares para cada parámetro seleccionado utilizando el software Expert Choise.

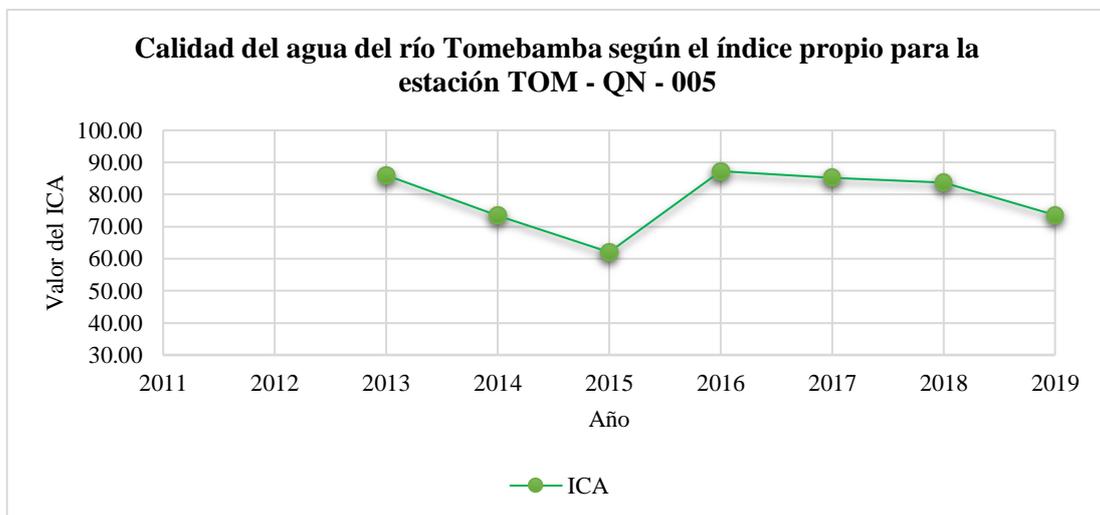
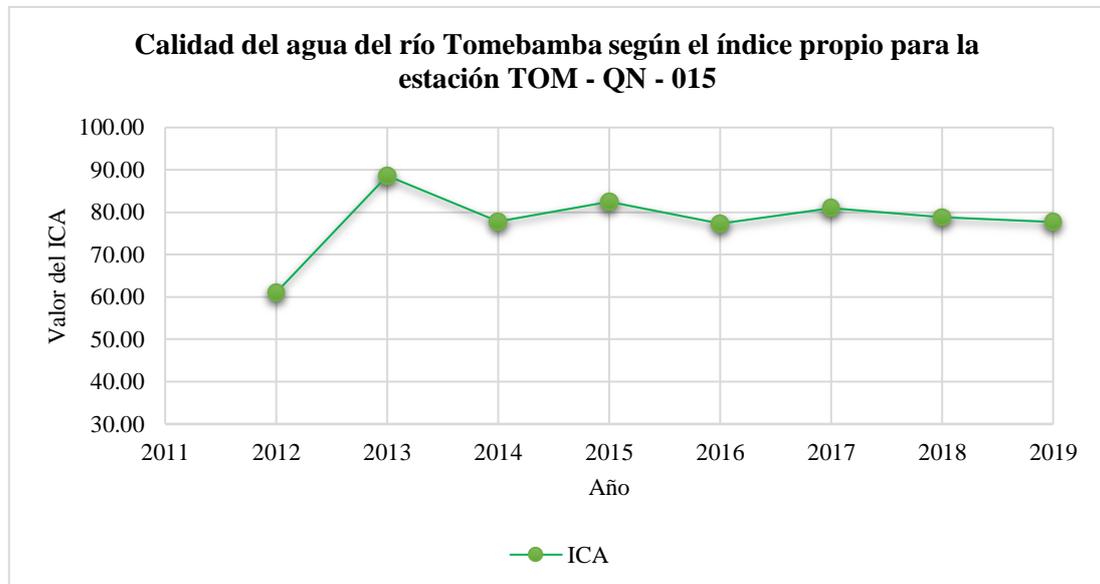
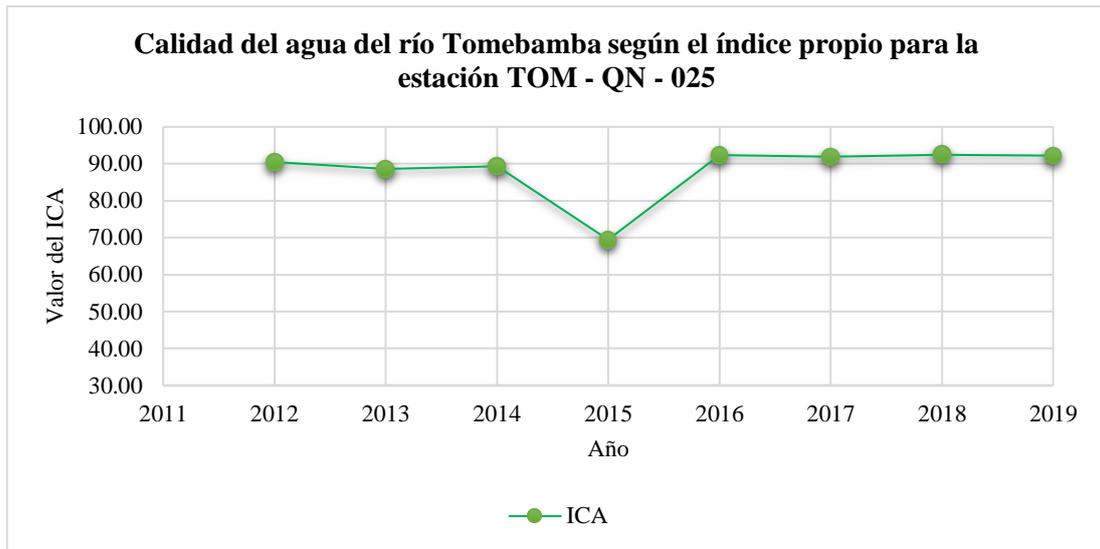


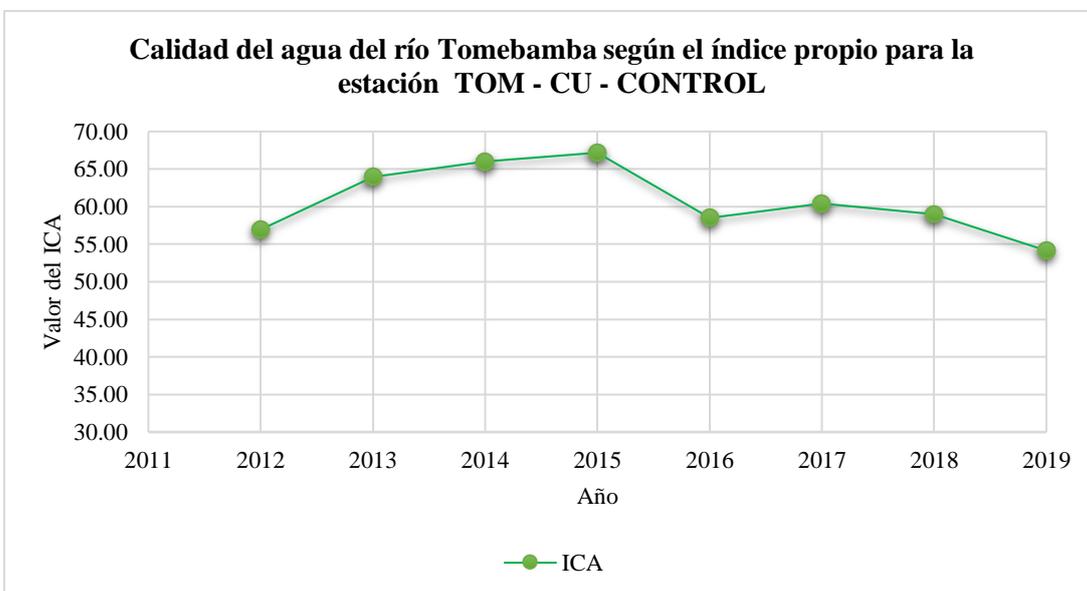
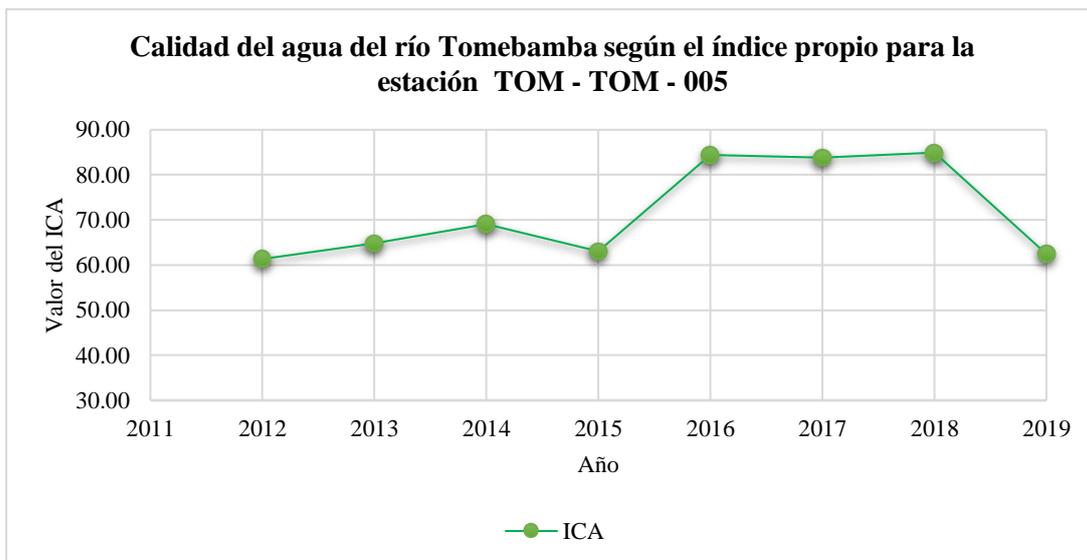
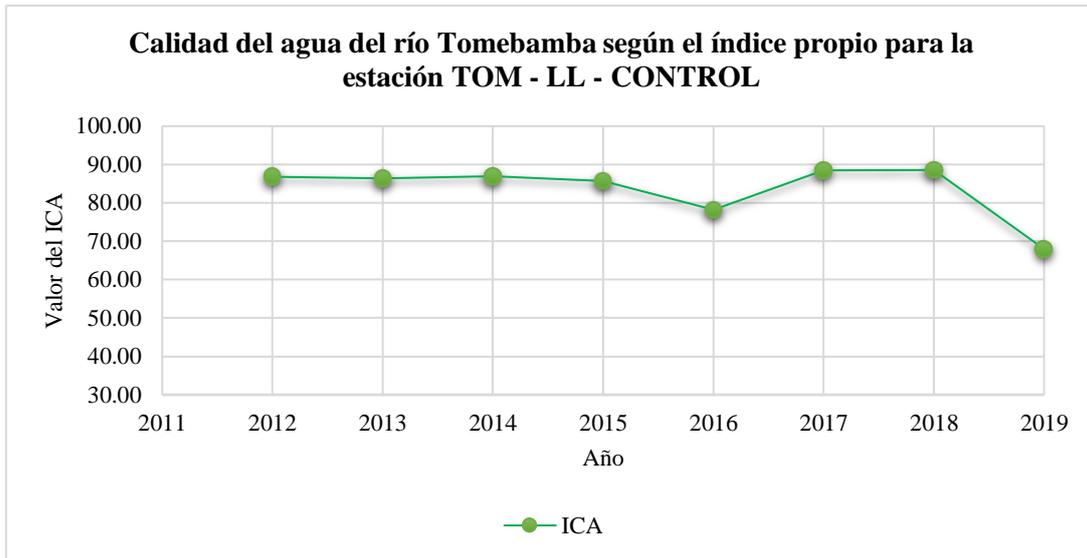
Anexo 9: Pesos individuales de la comparación por pares de los 14 encuestados junto con la relación de coherencia.

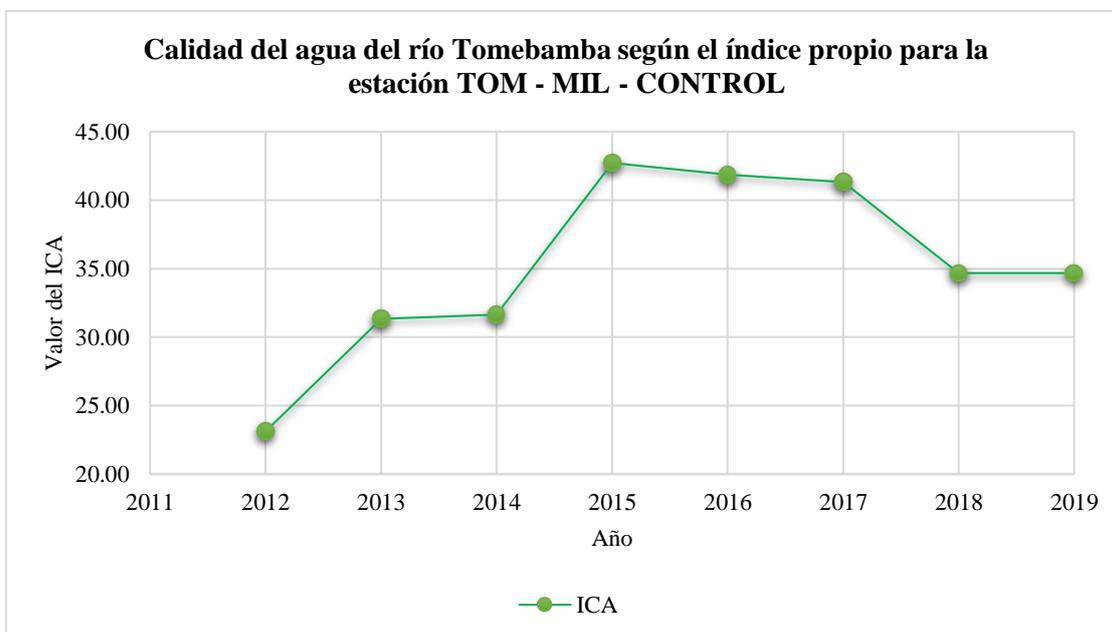
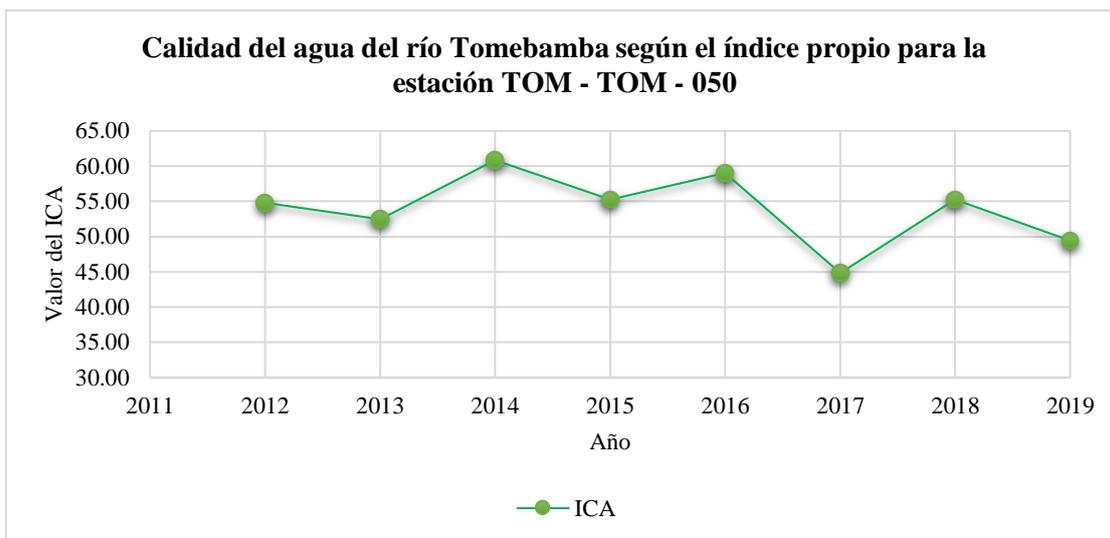
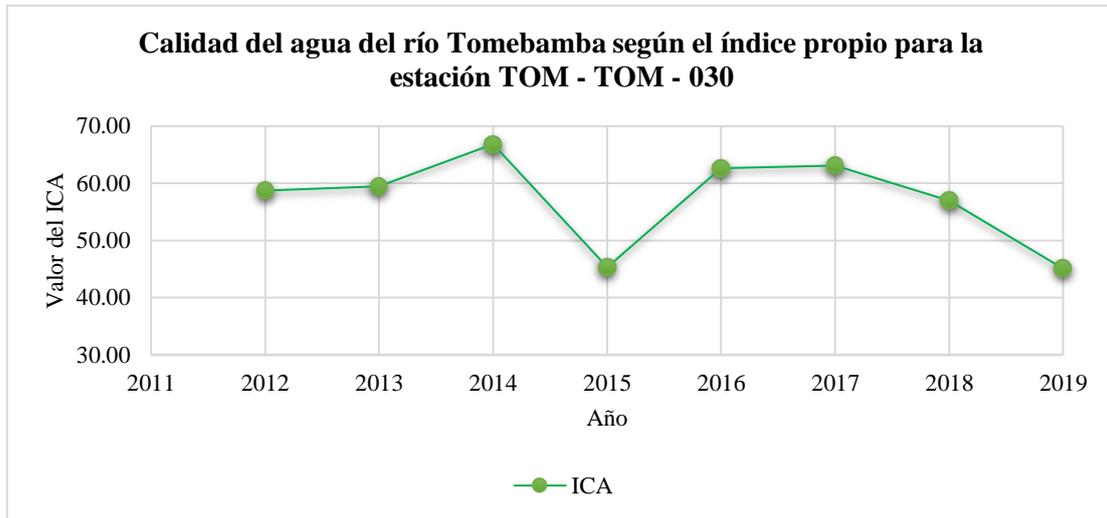
Tabla 50: Pesos de los parámetros de acuerdo a cada matriz de comparación por pares

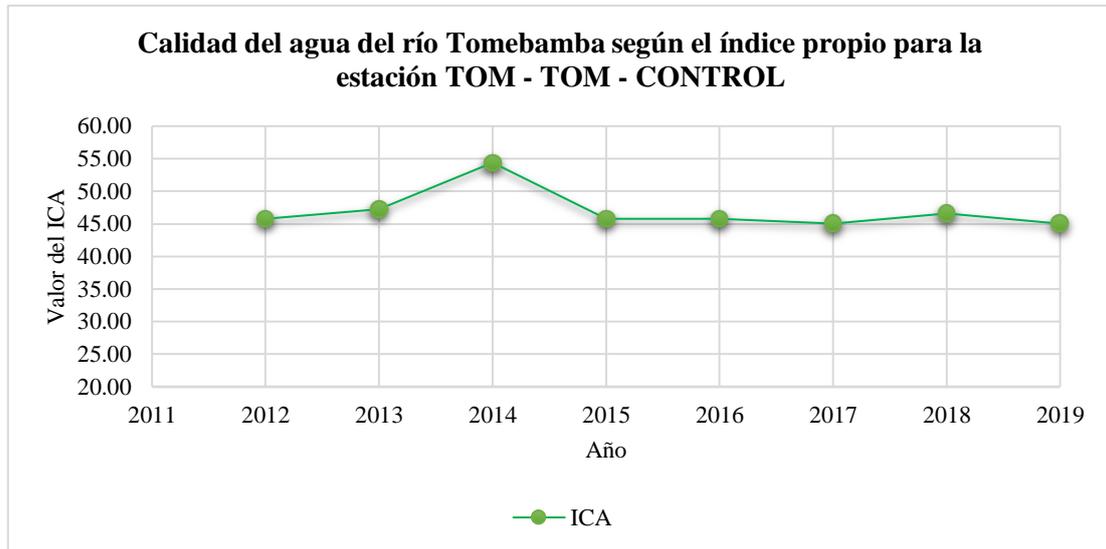
Parámetros	Pesos de los encuestados													
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14
Coliformes fecales	0.283	0.242	0.288	0.151	0.217	0.228	0.233	0.266	0.145	0.316	0.23	0.346	0.335	0.211
Color	0.099	0.088	0.201	0.271	0.124	0.069	0.278	0.076	0.135	0.098	0.223	0.053	0.112	0.241
Dureza	0.088	0.065	0.135	0.091	0.125	0.069	0.187	0.065	0.095	0.127	0.156	0.06	0.122	0.188
DBO	0.181	0.156	0.094	0.067	0.149	0.168	0.075	0.146	0.104	0.107	0.081	0.182	0.147	0.091
Turbiedad	0.046	0.071	0.076	0.155	0.077	0.058	0.087	0.072	0.107	0.109	0.109	0.144	0.086	0.093
% Oxígeno disuelto	0.104	0.171	0.057	0.051	0.13	0.167	0.036	0.128	0.095	0.041	0.055	0.073	0.069	0.048
Sólidos totales	0.055	0.047	0.044	0.06	0.052	0.045	0.041	0.102	0.083	0.044	0.042	0.055	0.029	0.048
Nitratos	0.103	0.05	0.038	0.045	0.035	0.046	0.031	0.056	0.082	0.042	0.03	0.038	0.03	0.038
pH	0.032	0.063	0.038	0.061	0.05	0.078	0.019	0.053	0.078	0.068	0.037	0.028	0.041	0.021
Temperatura	0.01	0.049	0.029	0.088	0.042	0.071	0.013	0.036	0.076	0.047	0.036	0.02	0.03	0.021
Sumatoria	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Relación de coherencia	0.081	0.060	0.011	0.067	0.094	0.081	0.067	0.094	0.074	0.087	0.195	0.195	0.188	0.181

Anexo 10: Representación gráfica de la variación del índice de calidad del agua de acuerdo a los resultados obtenidos aplicando el índice propio – AHP.

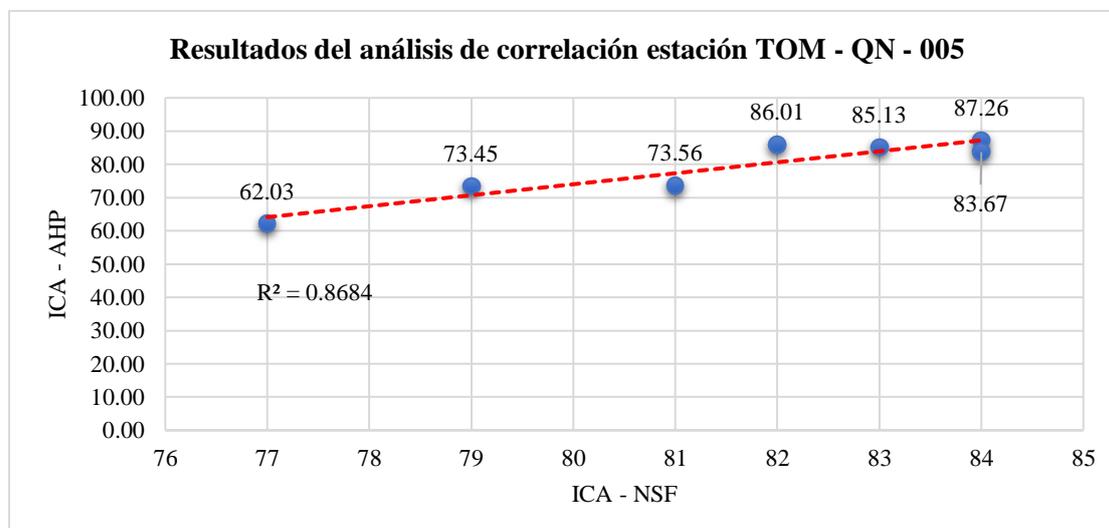
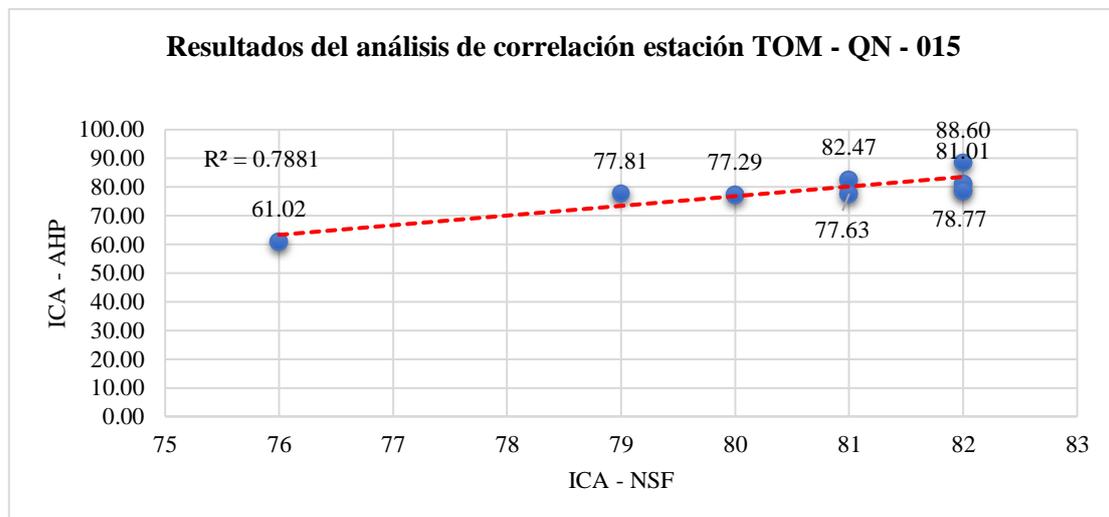
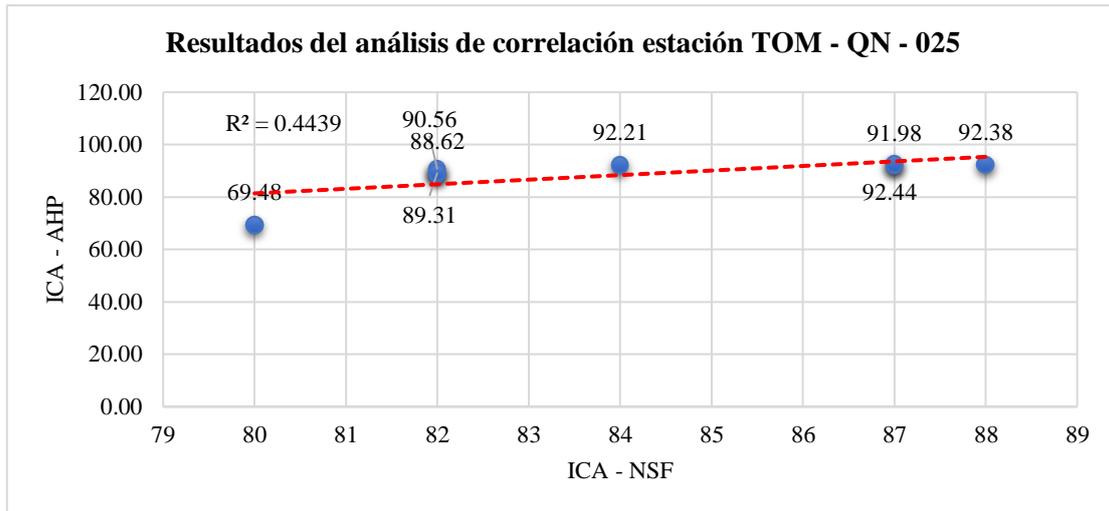


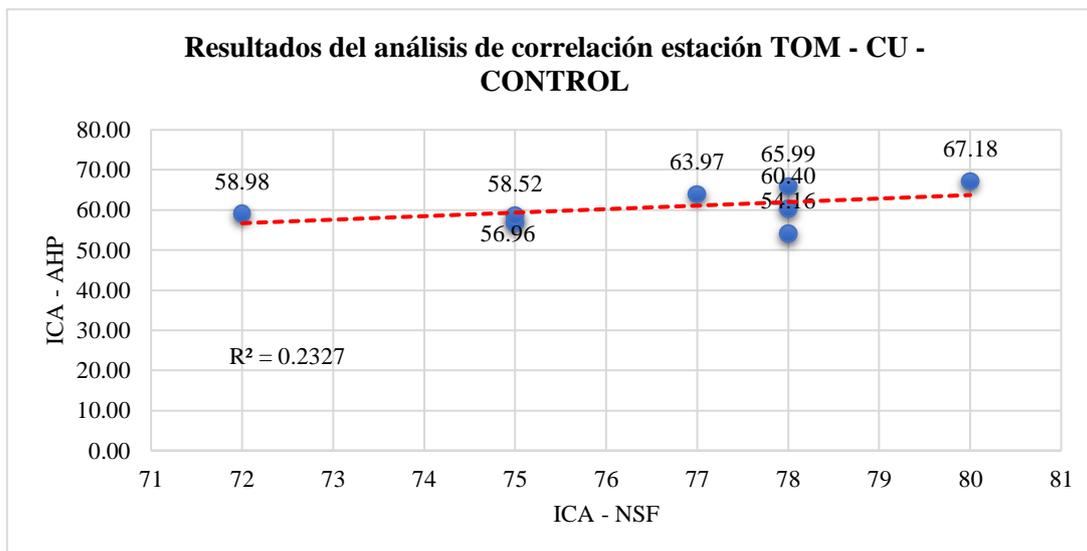
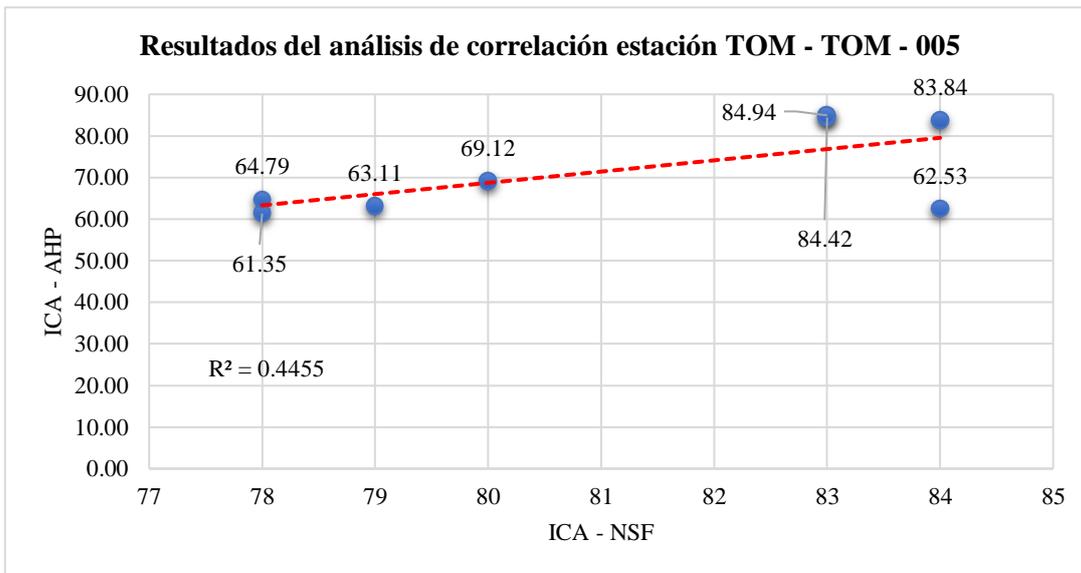
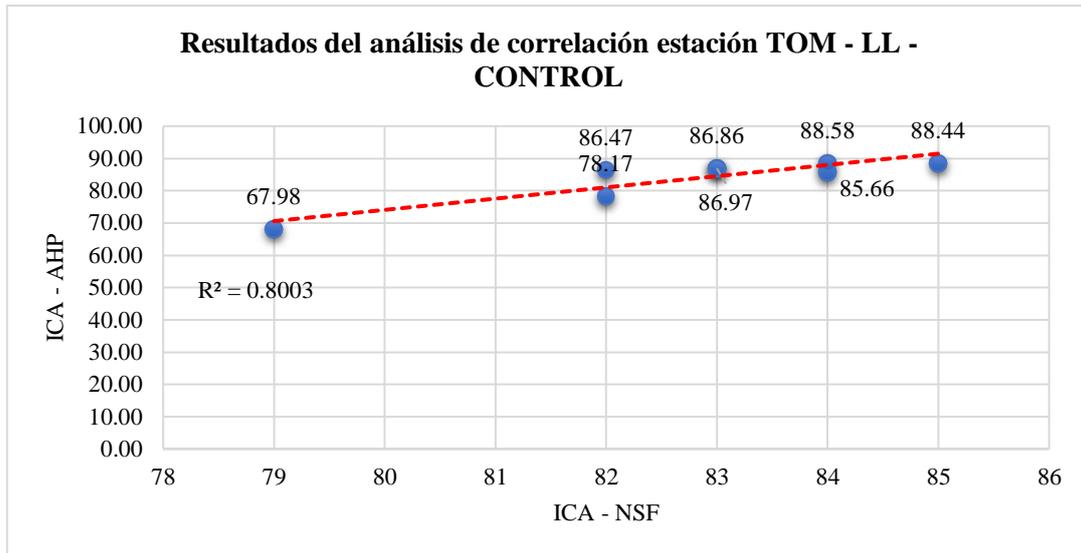


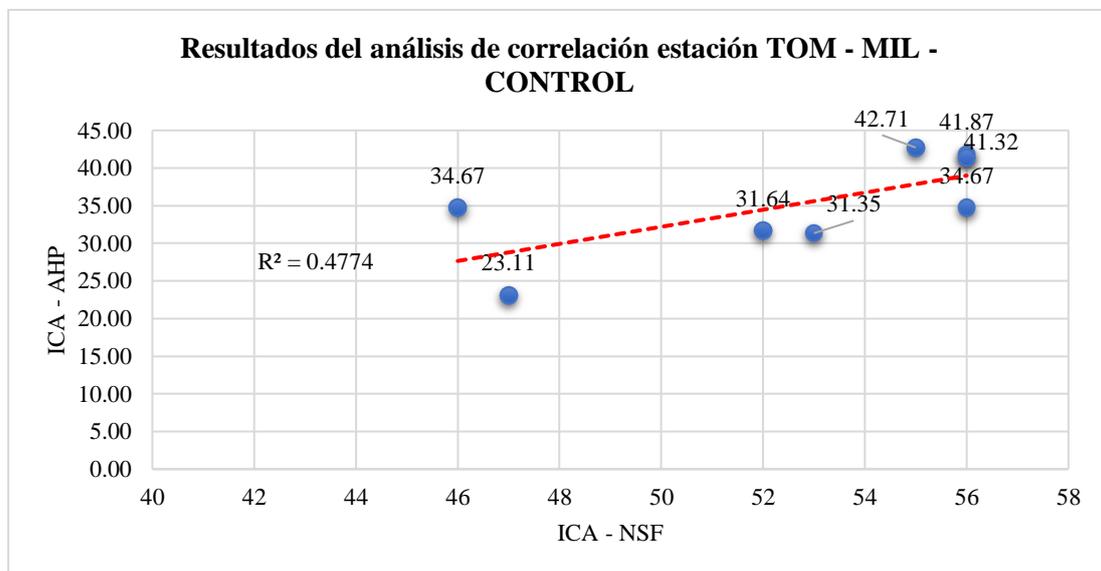
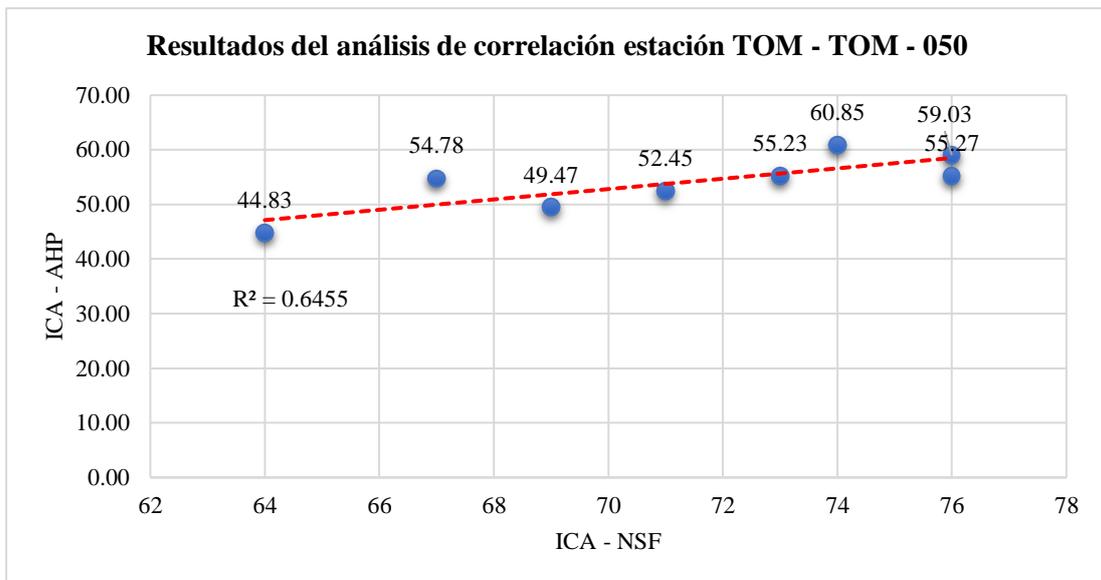
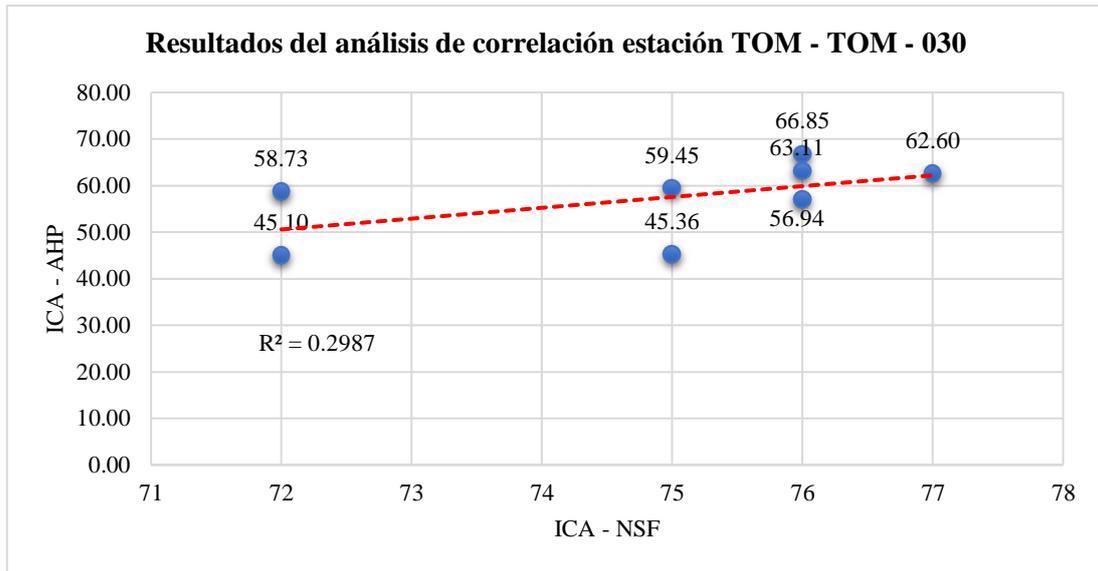


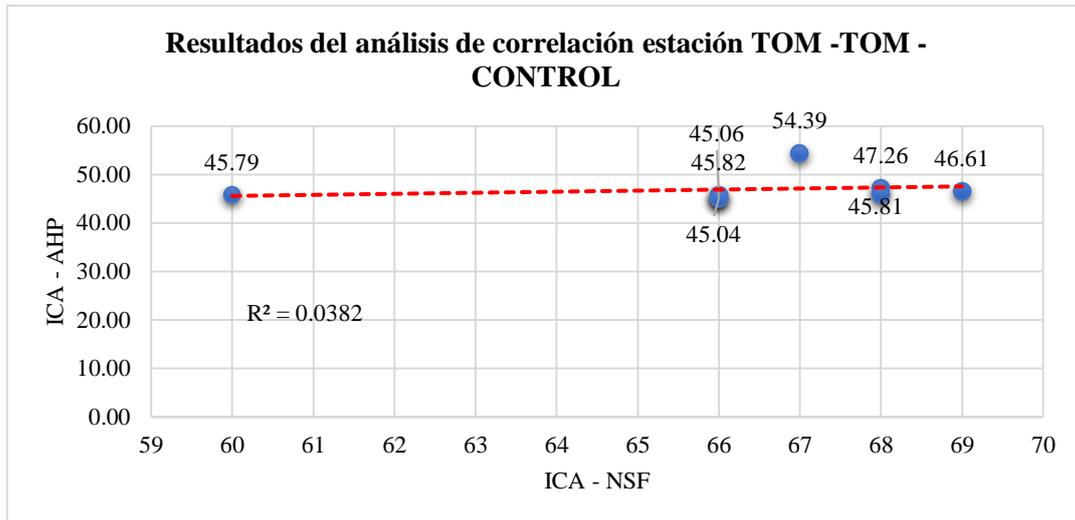


Anexo II: Representación gráfica del análisis de correlación entre el índice NSF y el índice propio para cada estación de monitoreo.









Anexo 12: Representación gráfica del análisis de correlación entre el índice de Dinius y el índice propio para cada estación de monitoreo

