

CALIDAD DE LA GASOLINA SUPERIOR DE COSTA RICA ENTRE LOS AÑOS 2006-2010

Víctor Bazán Salazar ^{1*}

¹ Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ), Universidad de Costa Rica

Recibido junio 2017; aceptado junio 2018

Abstract

This study explores the behavior and evolution on the quality of premium spark-ignition engine gasoline distributed in Costa Rica during the period 2006 to 2010. Traditionally, fuel behavior studies are done on univariate and bivariate statistical methods but fail to provide sufficient information to describe the relationship between the attributes and multidimensionality of the individuals' behavior information. To overcome this limitation, a principal component analysis (PCA) is performed using the data gathered during the five years of the study. Additionally, an automatic classification by an ascending hierarchical classification, using the Ward method and the classical euclidean distance was performed to determine the behavior of individuals when forming groups with similar characteristics. Based on the analysis, it is found that premium gasoline evolves toward a less contaminant fuel where the main improvement is the reduction in olefins and benzene content. However an increase in the composition of heavy fuel fractions is observed, resulting in an increment in the second half of the distillation curve and in the distillation residue. All centers of gravity are kept within the limits of the current regulations.

Resumen

Este estudio explora el comportamiento y evolución de la calidad de la gasolina superior que se distribuyó en Costa Rica durante el periodo 2006-2010. Tradicionalmente, el estudio del comportamiento de los combustibles se basa en métodos estadísticos univariantes y bivariantes que no logran proporcionar información suficiente para describir las relaciones entre los atributos y el comportamiento multidimensional de los individuos. Para solventar esta limitante, se realizó un análisis de componentes principales (A.C.P.) con datos de los cinco años del estudio. Además, se realizó una clasificación automática mediante una clasificación jerárquica ascendente, usando el método de Ward y la distancia euclídea clásica, para determinar el comportamiento de los individuos a la hora de formar grupos con características afines. El análisis de los resultados demuestra que la gasolina superior evoluciona hacia un combustible menos contaminante, donde la principal mejora es en la disminución en el contenido de olefinas y benceno en el combustible. Sin embargo, un aumento en la composición de fracciones pesadas del combustible se observa, dando como resultado un incremento en la segunda mitad de la curva de destilación y en el residuo de la destilación. Todos los centros de gravedad se mantienen dentro de los límites de la reglamentación vigente.

Key words: Premium gasoline, PCA, CELEQ fuel quality.

Palabras clave: Gasolina regularACP, CELEQ, calidad de combustibles.

* INVID3.CELEQ@ucr.ac.cr

I. INTRODUCCIÓN

Costa Rica tiene una larga historia en velar por la regulación de los servicios públicos que utilizan todos sus habitantes. Desde la creación del Servicio Nacional de Electricidad (SNE) en el año 1928 y su posterior transformación hacia la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) en 1996, un sistema regulatorio se ha instalado progresivamente con el fin de regular todos los servicios públicos incluyendo energía, concesión de obra pública, telecomunicaciones, agua, saneamiento ambiental, combustibles y transportes. Sin embargo, no fue hasta mediados del año 2001, cuando formalmente se da inicio con el programa de evaluación de la calidad de los combustibles, mediante convenios establecidos con los laboratorios estatales, como el Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ) y el Laboratorio Costarricense de Metrología (LACOMET), con el fin de establecer un control mediante visitas a todas las estaciones de servicio del país. Este control consiste en evaluar aspectos tales como: la calidad, la cantidad, la continuidad y el precio de los combustibles que se expenden.

En el 2005, se elige al CELEQ como el único laboratorio encargado de llevar el Programa. Lo anterior significa que toda la información de la evaluación de todos los parámetros de calidad, para tres combustibles (Diesel, gasolina plus y gasolina superior), tres veces al año, en unas 350 estaciones, van a ser custodiadas en una sola base de datos. Esto es de gran importancia a nivel nacional, ya que solo durante el periodo del 2006 al 2010 se debió determinar la calidad de aproximadamente 60 millones de barriles del producto refinado que se movilizaron en las estaciones de servicio; siendo la gasolina superior un 17 % de este volumen. Esto significa que cerca de 840 miles de millones de colones se movilizaron por ventas de este combustible en este periodo de 5 años [1]. Dado el alto volumen de hidrocarburos que se distribuye en el país y sus emisiones al ser utilizados, es de especial interés describir y entender las variables de calidad que gobiernan estos combustibles distribuidos en el país.

El análisis de los combustibles con la periodicidad que se hacen al año, genera un volumen de información cuantioso, que se vuelve necesario el uso de herramientas más sofisticadas para su estudio, en vez de un simple estudio unidimensional sobre cada variable. De otra forma, la información se podría diluir y no se podría lograr una representación correcta de las tendencias, principalmente por su alta variabilidad, y no se obtendría información acerca de interacciones entre las distintas variables. Por ejemplo, dentro del estudio unidimensional tradicional donde se consideran los promedios anuales entre todas las entradas (estaciones), se diluye la información recolectada en un simple promedio y su desviación estándar y asume que el comportamiento de los datos siguen una distribución normal. El principal problema es que no siempre los datos se comportan como una distribución normal y no se realiza una evaluación de normalidad para aseverar este comportamiento. Por lo anterior, el analista supone un comportamiento de los resultados a priori y establece conclusiones a partir de estos supuestos y no se permite identificar relaciones entre todas las variables al mismo tiempo. Caso contrario que ocurre cuando se aplican técnicas multivariantes para analizar los datos de forma multidimensional.

Uno de estos métodos multivariantes es el análisis de componentes principales (A.C.P.) donde el objetivo es encontrar un conjunto de nuevas variables sintéticas ortogonales denominadas componentes principales, cuya información sea lo más parecida a la de las variables originales. De esta forma se logra visualizar el patrón de similitud de las observaciones y de las variables como los puntos en los mapas[2].

En general, cuando se utilizan datos de muchas variables e individuos, estas se pueden representar como una nube de puntos en espacios vectoriales de muchas dimensiones (espacios de dimensión de acuerdo al número de variables e individuos que se utilicen, digamos p y n

respectivamente). Sin embargo, si la dimensión del espacio vectorial es superior a 3 ya no es posible visualizar las relaciones en la nube de puntos con el ojo humano. Por lo tanto, la idea central del A.C.P. es reducir la dimensionalidad del conjunto de datos, al tiempo que conserva tanto como sea posible, la variación presente en el conjunto [3]. Esto significa que hay una pérdida mínima de información al proyectar los individuos sobre un espacio de dimensión menor, de manera que la forma de la nube se asemeje lo mejor posible a su forma original [2]. Una de las ventajas de esta herramienta es la no necesidad de asumir un comportamiento probabilístico a priori en las variables. [3]

El presente trabajo es un complemento al estudio estadístico realizado para los primeros cinco años de registro denominado "Estudio Estadístico 2006-Noviembre 2010" [4] y busca extender el análisis de los resultados describiendo tanto las relaciones entre las variables, como el comportamiento multidimensional de los individuos respecto a todas las variables en su conjunto, mediante el uso del Análisis en Componentes Principales (A.C.P.).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la base de datos

La base de datos es un repositorio de todos los resultados del análisis de variables fisicoquímicas que determinan la calidad de gasolina superior durante el periodo del 2006 al 2010, para cada una de las estaciones de servicio del país. Ella cuenta con registros de quince variables: punto inicial de destilación, destilación al 10 %, destilación al 50 %, destilación al 90 %, destilación final, residuo de la destilación, presión vapor Reid, densidad o gravedad API, octanaje, oxigenados, benceno, aromáticos, olefinas, agua y sedimento e índice de manejabilidad ordinario (ODI). Este último índice se calcula a partir de los valores obtenidos para la destilación al 10 %, destilación al 50 %, destilación al 90 % y tiene como objetivo proporcionar control de los parámetros de destilación que influyen en el arranque en frío y la facilidad de conducción en caliente. Este último parámetro incluye una corrección por el contenido de alcohol en el combustible como compuesto oxigenante, sin embargo, debido a que la gasolina superior distribuida durante este periodo no lo utilizó y se empleó metil tert-butil éter (MTB) como oxigenante[5], entonces se utilizó la relación simplificada expuesta por George E. Totten[6].

Pre-tratamiento de los datos

Por simplificación del estudio y debido a la complejidad de trabajar simultáneamente variables tanto cuantitativas continuas como cuantitativas discretas y cualitativas, se decide no usar en este análisis las variables cualitativas. De esta manera, las variables resultantes para el análisis fueron: punto inicial de destilación, destilación al 10 %, destilación al 50 %, destilación al 90 %, destilación final, residuo de la destilación, presión vapor Reid, densidad o gravedad API, octanaje, oxigenados, benceno, aromáticos, olefinas e índice de manejabilidad ordinario (ODI).

En ocasiones, la muestra de combustible analizada puede generar resultados con valores menores a los cuantificables por el método aplicado. Cuando esto ocurre, el laboratorio indica en el reporte y registra que el valor es inferior al límite cuantificable por el método. En estos casos, se decide eliminar la inecuación sustituyéndola por el valor del límite inferior cuantificable del método.

Pre-tratamiento de datos para el análisis de componentes principales (A.C.P.)

Para este análisis es imprescindible considerar todos los individuos que cuenten con información sobre los parámetros de calidad de los combustibles, sin importar si se repiten en todos los años del estudio o si solamente la estación de servicio aparece en una ocasión. Por lo tanto, se utilizaron todos los individuos que poseían más del 70 % de información en sus atributos. Lo que significa que los individuos que tuvieron al menos diez datos registrados de sus catorce variables de estudio fueron utilizados para el análisis. Los restantes individuos fueron descartados, ya que no aportaban información suficiente para el estudio.

La selección de individuos generó que los datos faltantes en las variables se redujeran considerablemente. En el caso de la base de datos, las variables tienen valores superiores al 99 % de los datos, por lo que no es necesario eliminar ningún atributo por ausencia de información. Los datos faltantes fueron completados con el promedio de los valores para los cinco años de estudio; es decir se calculó el promedio por atributo de los cinco.

Los datos se centran y se estandarizan con el fin de que todos utilicen una métrica M igual a la identidad de tamaño $p \times p$, donde p es el número de variables. Además, debido a que todos los individuos poseen el mismo peso o ponderación, la métrica de pesos D es igual a la matriz diagonal de la inversa del número de individuos de cada matriz.

Para el análisis en componentes principales se utiliza el programa informático R [7] versión 3.4.0, junto con los paquetes FactoMiner [8] versión 1.34, rlg [9] versión 0.97.0, fmsb [10] versión 0.5.2 y ggplot2 [11] versión 2.2.1.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de componentes principales para la gasolina superior entre los años 2006-2010:

Para dar una descripción adecuada de los datos para gasolina superior se recurre a la herramienta del análisis de componentes principales, la cual busca generar un nuevo espacio de variables sintéticas ortogonales (componentes principales), que presenten una acumulación de la inercia en las primeras componentes principales, de forma que se pueda proyectar tanto los individuos (estaciones de servicio) como las variables sobre espacios de menor dimensión. Esta reducción de dimensión trata explicar el comportamiento de los datos en espacios dimensionales que puedan ser analizados por el ojo a simple vista (en planos o espacios tridimensionales). El cambio de base es simplemente una descomposición en valores singulares (SVD) de la tabla centrada y normada.

Luego para determinar el número de componentes necesarias que puedan representar la proyección de la nube de datos sobre un espacio de menor dimensión, donde se maximice la inercia, es necesario ordenar en forma decreciente (ver Cuadro 1) las inercias de cada una de las componentes (valores singulares) y se genera el gráfico de sedimentación con estos valores. El caso de la gasolina superior se muestra en la Figura 1. De acuerdo a esta figura, se puede observar que entre la tercera y cuarta componente se tiene la suficiente inercia para poder representar los datos; además, el cambio a partir de este punto es tan pequeño, que si se incorpora una componente más, no adicionaría mayor información para la descripción del sistema. A partir de esto y debido a que las tres primeras componentes obtienen valores singulares mayores a uno (lo cual representa cerca del 75 % del total de la inercia) se decide hacer el análisis con las tres primeras componentes[12].

CUADRO 1. Valores propios y porcentajes de inercia para la tabla de gasolina superior

Componente	Valores propios	Inercia explicada (contribución)(%)	Inercia acumulada (%)
1	6.206	44.33	44.33
2	2.864	20.46	64.78
3	1.377	9.83	74.62
4	0.819	5.85	80.47
5	0.653	4.66	85.13
6	0.564	4.03	89.16
7	0.369	2.63	91.79
8	0.311	2.22	94.02
9	0.289	2.07	96.08
10	0.220	1.57	97.65
11	0.168	1.20	98.85
12	0.095	0.68	99.53
13	0.066	0.47	100.00
14	0.000	0.00	100.00

Una vez determinado el número de componente a utilizar, se pueden realizar las representaciones gráficas que describan el comportamiento de los datos, tal como se muestra en la Figura 2. En esta gráfica se observa cómo se distribuyen las 14 variables usadas sobre los tres círculos de correlación formados a partir de la combinación de las primeras tres componentes principales. Tomando el círculo de correlación formado por la primera y segunda componente se observa que las variables se distribuyen alrededor de todo el círculo, pero en este se puede apreciar un grupo importante de variables alrededor del eje positivo de la primera componente, integrado por: ODI, aromáticos, densidad y las temperaturas al 50 %, 90 %, y final de destilación. De forma opuesta se tiene que el contenido de olefinas y los compuestos oxigenados posee un comportamiento contrario con respecto al grupo anterior. Esto correlaciona el contenido de aromáticos en la gasolina con la densidad del combustible y las temperaturas de destilación a partir del 50 % del volumen. El caso contrario, presenta una correlación inversa entre el contenido de olefinas y oxigenados con la densidad del combustible y las temperaturas al 50 %, 90 % y al 100 % de la curva de destilación. Esto se puede explicar a que el peso molecular de las fracciones presentes en el combustible influye directamente en la segunda mitad de la curva de destilación (temperaturas de destilación 50 %, 90% y final) y en la densidad de la gasolina superior: los compuestos aromáticos son más pesados que las olefinas y los compuestos oxigenados.

Para el círculo de correlaciones generado a partir de la segunda y tercera componente se aprecia que existe un grupo de variables alrededor del eje positivo de la segunda componente principal (temperatura inicial de destilación, temperatura al 10 % del volumen destilado y contenido de benceno). De forma opuesta se tiene que la presión de vapor Reid de la gasolina posee un comportamiento inverso con respecto al grupo anterior. Por lo tanto, la segunda componente principal opone estas dos medidas de volatilidad del combustible. Esto es de gran importancia para la gasolina ya que la temperatura de evaporación al 10 % debe ser lo suficientemente baja como para asegurar el arranque a temperaturas normales pero al mismo tiempo, la presión de vapor de combustible debe ser lo suficientemente alta como para asegurar la facilidad de arranque del motor. Esta última debe controlarse de tal forma que no sea tan alta como para contribuir a las emisiones de vapores de bloqueo o evaporación excesiva y las pérdidas en funcionamiento. [13]

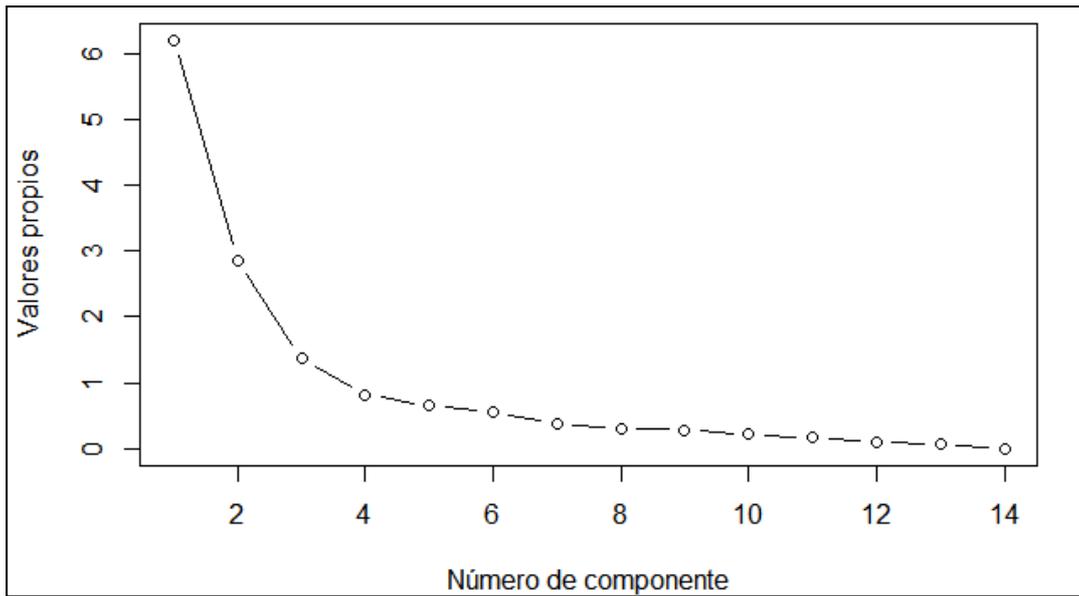


FIGURA 1. Gráfico de sedimentación para la tabla de datos que contiene los 5 años del estudio

Las variables índice de octano, oxigenados y residuos de la destilación aunque no logran formar un grupo bien definido en ninguna de las gráficas de la Figura 2, presenta una clara correlación con la tercera componente. Para este caso las variables octano y oxigenados, como es de esperar, tienden a seguir un mismo comportamiento ya que los compuestos oxigenados incrementan el índice de octanos de la gasolina [14]

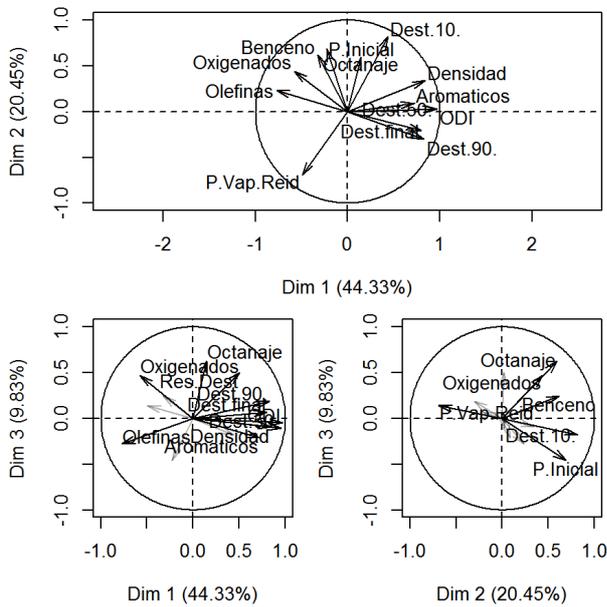


FIGURA 2. Círculos de correlaciones para las componentes 1-2, 1-3 Y 2-3

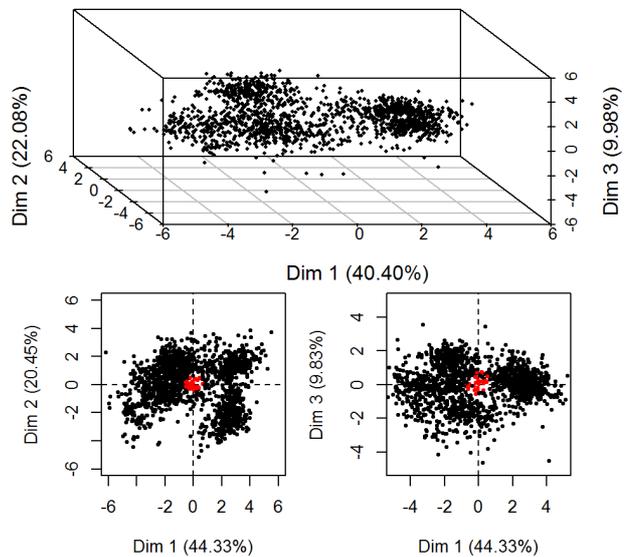


FIGURA 3. Espacio tridimensional para los individuos y planos principales 1-2 y 1-3

El caso de los residuos de la destilación está mayormente influenciado por una correlación negativa con la temperatura inicial de la destilación y el contenido de olefinas. Aunque estas dos variables están fuertemente correlacionadas con otras componentes principales, se presenta una pequeña correlación con la tercera componente, indicando que cuando la cantidad de olefinas aumente en la gasolina superior mayor va a ser la temperatura inicial de destilación y menor cantidad de residuos de la destilación. Esta última observación es contra-intuitiva ya que se conoce

que las olefinas son térmicamente inestables y pueden tender a la formación de gomas y depósitos en el motor[14].

Dada la descripción anterior del comportamiento de las variables y su ubicación en los planos principales, es posible etiquetar a estas tres componentes principales de la siguiente forma: la primera componente que “separa las fracciones ligeras de las pesadas” en el combustible, la segunda componente como “la que facilita el arranque en frío” del motor y la tercera componente se puede etiquetar como “el contenido de octanaje del combustible”.

La figura 3 muestra la proyección de la nube de datos para los parámetros de calidad de la gasolina superior en cada una de las estaciones evaluadas durante el periodo 2006-2010, en el espacio generado por las tres primeras componentes principales. En estas figuras, se puede observar como la primera componente segrega a las estaciones en dos grandes grupos, separándolos por sus diferencias en la composición de las fracciones del combustible, mientras que la segunda componente logra dividir al grupo que se encuentra sobre el eje positivo de la primera componente en dos subgrupos, los cuales los separa su diferencia en la facilidad de arranque en frío en el motor. La tercera componente separa el subgrupo que se encuentra sobre el eje negativo de la primera componente en tres subgrupos donde el diferenciador es el índice de octanaje del combustible. Para identificar si estos subgrupos encontrados son consistentes y si realmente los individuos son homogéneos entre sí, se realiza una clasificación automática a los datos.

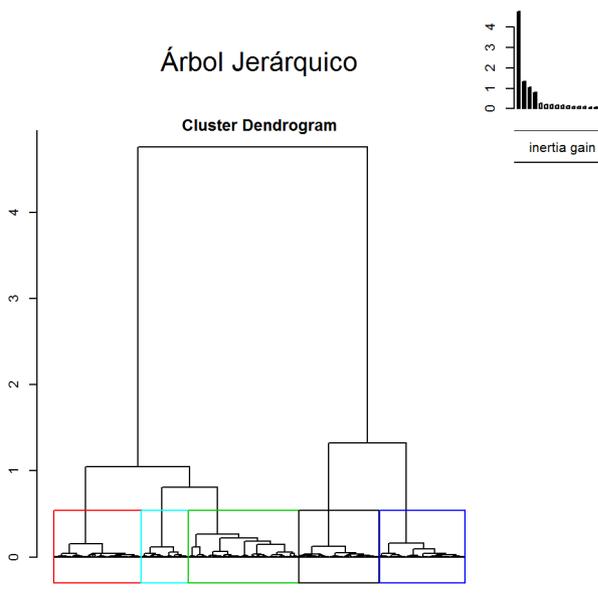


FIGURA 4 Dendrograma con clasificación jerárquica de cuatro clúster para los 5 años de estudio

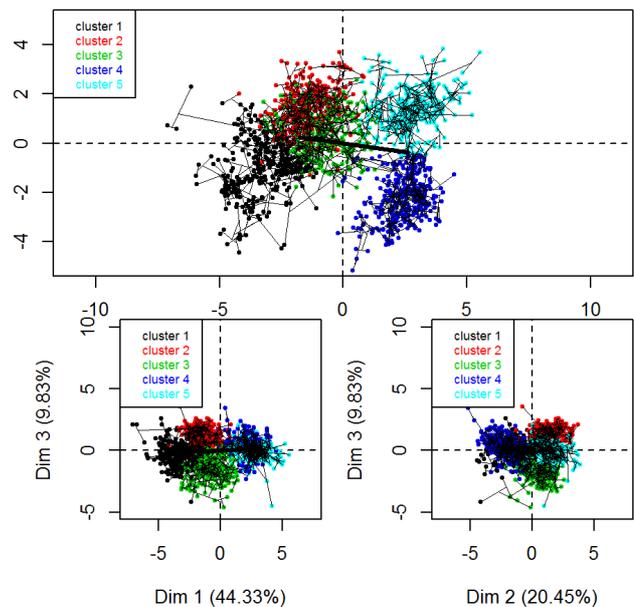


FIGURA 5 Planos principales 1-2, 1-3 y 2-3 con los cuatro aglomerados encontrados

Debido al análisis descrito anteriormente y aunado a que el objetivo del estudio es poder describir cómo se comportan las estaciones de servicio y cómo se agrupan, se aplica una clasificación automática de los grupos mediante una clasificación jerárquica ascendente. Esta clasificación automática consiste en una clasificación jerárquica ascendente usando el método de Ward y la distancia euclídea clásica, tal como se observa en la Figura 4. Este árbol jerárquico (dendrograma), generado a partir de las estaciones de servicio, reúne y enlaza por medio de nodos a los individuos más cercanos, creando grupos de individuos similares en los niveles inferiores del gráfico. Conforme aumentan las disimilitudes entre los individuos, los nodos que enlazan los distintos grupos se elevan, hasta que todos los grupos de individuos quedan enlazados en un último nodo. Formando de esta manera, un árbol de fácil interpretación, donde se enlazan y

agrupa a todos los individuos con respecto a su similitud y se separan los grupos respecto a sus disimilitudes, ya que entre más alto queden los nodos que los enlaza más disímiles son los grupos. En este caso el "corte óptimo" del árbol se realiza en cinco conglomerados. Ver Figura 4.

A partir de esta clasificación, se pueden identificar los cinco clústeres proyectados sobre los tres primeros planos principales, tal como se observa en la Figura 5, donde claramente se observa un comportamiento consistente a lo descrito anteriormente. Al comparar la distribución de los clústeres encontrados sobre los planos principales y la distribución de las variables en los círculos de correlación, se puede describir cómo los grupos de estaciones se comportan. Por ejemplo, los clústeres 1, 2 y 3 los cuales se encuentran ubicados sobre el eje negativo de la primera componente, nos indican que estos grupos van a presentar niveles más altos que el promedio en la cantidad de olefinas pero al mismo tiempo presentan bajas concentraciones de compuestos aromáticos y bajas temperaturas de destilación finales, densidad y benceno, indicando que el combustible en estos tres clústeres contiene relativamente menor cantidad de fracciones pesadas que los otros dos grupos.

Por otro lado, como se vio previamente, los clústeres 1-3 y 4-5 presentan una diferencia en la concentración de las fracciones ligeras y pesadas en el combustible. Existe una marcada separación entre estos dos subgrupos producto de las diferencias entre temperaturas de destilación iniciales y la presión de vapor. Esto nos indica que el combustible encontrado en los clústeres 1 y 4 presenta mejores características para el arranque en frío del motor, en comparación con el combustible encontrado en los clústeres 3 y 5.

De los planos 1-3 y 2-3 se puede apreciar que va a existir una fuerte diferencia en los contenidos de octanos, oxigenados y en el residuo de la destilación entre los clústeres 2 y 3, principalmente. Indicando que el combustible distribuido en las estaciones pertenecientes al clúster 2 presentaba una gasolina más rica en octano que la distribuida en las estaciones pertenecientes al clúster 3. Para cuantificar estas diferencias, se calculan los centros de gravedad de cada uno de los conglomerados encontrados (valor promedio en cada uno de los clúster) en el Cuadro 2 y su representación en la Figura 6.

CUADRO 2. Centros de gravedad para las clases encontradas por la clasificación jerárquica ascendente

Clúster	P.Inicial	Dest.10.	Dest.50.	Dest.90.	Dest.final	Res.Dest	P.Vap.Reid
clust1	34.91	52.41	87.90	156.6	193.8	0.802	62.65
clust2	35.23	54.87	93.10	160.1	197.6	0.904	58.83
clust3	36.36	54.83	96.90	159.1	199.6	0.793	58.82
clust4	32.67	52.93	103.5	173.2	208.6	0.941	60.41
clust5	35.55	56.91	103.8	167.6	205.5	0.953	56.41
Clúster	Densidad	Octanaje	Oxigenados	Benceno	Aromáticos	Olefinas	ODI
clust1	739.4	95.13	1.51	1.05	25.71	22.50	499
clust2	742.9	96.57	1.87	1.368	26.00	19.65	522
clust3	744.4	95.05	1.28	1.05	27.48	22.26	532
clust4	746.7	95.32	1.02	0.7	28.31	13.35	563
clust5	752.2	96.33	1.18	1.038	29.23	15.05	564

Ahora bien con los centros de gravedad de cada uno de los clústeres formados y la Figura 6 se puede describir el comportamiento de cada uno de los conglomerados encontrados de la forma que se describe en los siguientes párrafos.

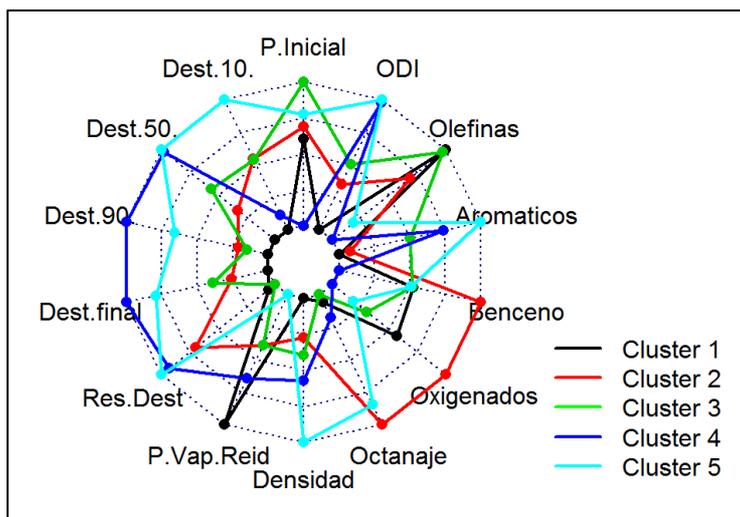


FIGURA 6. Gráfico tipo radar para los centros de gravedad encontrados

El clúster 1 es el que presenta los valores más bajos de temperatura en la curva de destilación y densidad, línea negra en la figura 6, sugiriendo que el combustible encontrado en este grupo de estaciones es más rico en fracciones pequeñas y poco complejas de hidrocarburos, si se compara con los otros cuatro clústeres. Esto también se refleja en el alto valor obtenido para la presión de vapor Reid y en el bajo contenido de compuestos aromáticos en el combustible. Por lo tanto, este combustible se puede catalogar como una gasolina con mayor volatilidad y cantidad de compuestos oxigenados, pero un menor número de octanos y una mayor presencia de contaminantes (olefinas y benceno). Además este combustible presenta el menor índice de manejabilidad ODI, indicando que es una gasolina que favorece el arranque en frío y el rendimiento en caliente a temperatura ambiental moderada [14].

El clúster 2 también posee una curva de destilación y densidad baja, aunque un poco mayor que los valores encontrados para el clúster 1. Esto hace indicar que la gasolina superior perteneciente a este grupo de estaciones está también formada por una mayor cantidad de fracciones ligeras de hidrocarburos, explicando la baja presencia de compuestos aromáticos. Por otro lado, la alta presencia de benceno puede explicar la disminución en la presión de vapor Reid encontrada en este grupo. Este clúster es el que presenta el número más alto de octanos y la mayor cantidad de compuestos oxigenados. Por lo tanto el combustible encontrado en este grupo de estaciones de servicio es de una gasolina que tiene un alto octanaje y oxigenación, lo cual aunado al bajo valor en el índice de manejabilidad hace que tenga un buen rendimiento y un fácil arranque, pero su alta presencia de benceno no la hace compatible con las actuales especificaciones internacionales [13].

El clúster 3 es el grupo que presenta la mayoría de las variables cercanas al promedio de todos los datos. Este aún presenta una curva de destilación relativamente baja y un valor del índice de manejabilidad bajo, el combustible mantiene una facilidad de arranque en frío y buen rendimiento en caliente, aun cuando presenta el número de octanos más bajo. Además tiene la temperatura inicial de destilación más alta de los cinco clúster, pero la diferencia es muy poca para que sea significativa. Lo que si hay que rescatar es que presenta contenido de olefinas cercanas a los encontrados en el clúster 1, haciendo que este combustible no sobrepase los límites descritos en el Worldwide Fuel Charter, 5ta edición, 2013.

El clúster 4 varía en el comportamiento visto anteriormente con respecto a la segunda mitad de la curva de destilación, elevando los valores en las temperaturas al 50 %, 90 %, y final del volumen recuperado en la destilación, aumentando paralelamente el índice de manejabilidad

ordinario (ODI). Estas características hacen que quede cerca del límite máximo descrito por Worldwide Fuel Charter, para gasolinas clase B (tipo de gasolina especificado en Decreto Ejecutivo N°32812 COMEX-MINAE-MEIC, La Gaceta N°245 del 20 de diciembre de 2005), pero aún por debajo del límite máximo establecido por la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM) en el documento D4814 – 16b. Este comportamiento infiere un aumento en las fracciones pesadas de hidrocarburos que componen al combustible, resultando en el incremento en el contenido de compuestos aromáticos y la densidad del líquido, pero con presencia de fracciones ligeras de hidrocarburos. Esto último puede explicar el incremento en la presión de vapor Reid con respecto al clúster anterior, haciendo que la gasolina encontrada en este grupo de estaciones de servicio mantenga las propiedades de un fácil arranque en frío y un buen rendimiento en caliente. Además la fuerte disminución en el contenido de olefinas hace que este combustible produzca una menor cantidad de emisiones de hidrocarburos altamente reactivos y compuestos tóxicos.

Por último, el clúster 5 presenta una ligera disminución en los valores finales de la curva de destilación con respecto al clúster anterior. Sin embargo, se observa en él un aumento en las temperaturas para la primera sección de esta misma curva. Esto implica que combustible encontrado en este grupo de estaciones de servicio presenta una menor cantidad de fracciones ligeras de hidrocarburos, con respecto a los anteriores combustibles, y una mayor proporción de fracciones pesadas. Esto se refleja también en el aumento del valor de densidad y el contenido de aromáticos. Además se obtiene el valor más alto en los residuos de la destilación y al mismo tiempo el valor más bajo en la presión de vapor Reid, lo que significa que este combustible probablemente va a tener mayor dificultad en el arranque en frío y un menor rendimiento en caliente con respecto a los combustibles vistos previamente. De igual manera que el clúster 4, el contenido de benceno y olefinas se mantiene bajo, pero el índice de manejabilidad (ODI) está al límite del valor máximo descrito para gasolinas clase B. Aun cuando se tiene el comportamiento descrito anteriormente, no se espera encontrar un desempeño adverso de este combustible en los motores, con fallos tales como la dilatación del arranque, número de ahogos del motor durante maniobras de parada y conducción y otros fallos. [14]–[16]

Una vez identificado el comportamiento de los clústeres, es de interés buscar cuál otra característica comparten en común las estaciones de servicio, para explicar la forma en que se agrupan de la manera anteriormente descrita. De igual forma que se hizo para el diesel y la gasolina regular, [17], [18] se realizó una distribución de la frecuencia en la coincidencia de los años con los cinco clúster encontrados, para determinar si se mantiene el patrón visto anteriormente. El cuadro 3 presenta tal distribución y se logra obtener el mismo patrón que para los combustibles previamente analizados, donde cada uno de los clústeres coincide bastante con cada uno de los años de estudio. Esto también se puede describir como la evolución de la gasolina superior con respecto a cada uno de los años del estudio.

CUADRO 3. Distribución en las frecuencias de los años del estudio en los cinco clústeres encontrados usando clasificación jerárquica

Año	Clúster 1	Clúster 2	Clúster 3	Clúster 4	Clúster 5
2006	72	9	232	0	1
2007	216	17	73	13	3
2008	18	306	3	0	0
2009	0	3	3	7	314
2010	1	0	0	305	29

IV. CONCLUSIONES

- Para el periodo de estudio, los datos se clasifican en cinco grupos que están ligados a una fecha en específico, lo cual sugiere que la calidad del combustible podría estar afectada por políticas anuales internas en Costa Rica o por una disponibilidad de producto terminado a nivel internacional. Esta situación es muy similar a la que se presenta durante el análisis realizado al diesel y a la gasolina regular, en dos publicaciones anteriores [17], [18].
- Durante el periodo analizado se observa una disminución paulatina de varios compuestos denominados como contaminantes. Entre las disminuciones más significativas se pueden citar el de las olefinas con una reducción aproximada de un 33 % y el contenido de benceno en 49 % entre los años de 2008 al 2010.
- La variación en el comportamiento del contenido de oxigenados mantiene cierta similitud con la variación en la importación de metil terbutil éter a Costa Rica proveniente de Estados Unidos después del 2008, donde se encuentra una disminución en sus valores [19]. Aún cuando la utilización de este compuesto fue prohibida mediante el decreto ejecutivo 35091 del 17 de marzo del 2009, RECOPE siguió utilizándolo como aditivo para oxigenar las gasolinas y aumentar el número de octanos.
- La formulación de la gasolina superior durante el periodo de análisis, sea para una disminución de compuestos contaminantes o por la disponibilidad del combustible en el mercado internacional, ha tendido a un combustible con una porción mayor de fracciones más pesadas, incidiendo esto en el aumento de las temperaturas de la curva de destilación y una mayor densidad del combustible.

V. REFERENCIAS

- [1] D. de S. al C. Dirección de Ventas, "Estadística de ventas," 2016. [Online]. Available: <https://www.recope.go.cr/productos/ventas/>. [Accessed: 19-Jul-2016].
- [2] J. Trejos, W. Castillo, and González Jorge, *Análisis Multivariado de datos, Métodos y aplicaciones*, First Edit. San José: Editorial Universidad de Costa Rica, 2014.
- [3] I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, Second Edi. New York: Springer-Verlag, 2002.
- [4] C. León Rojas and P. Zuñiga, "ESTUDIO ESTADÍSTICO 2006-Noviembre 2010." Universidad de Costa Rica, San José, p. 55, 2011.
- [5] R. Gurdián López, C. M. Chaves Jiménez, M. Loaiza Montoya, and Y. Valverde Mora, "Manual de Productos," San José, 2014.
- [6] G. . Totten, *Fuels and Lubricants Hand Book: technology, Properties, Performance and Testing*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2003.
- [7] R Core Team, "R: A Language and Environment for Statistical Computing." Vienna, Austria, 2016.
- [8] F. Husson, J. Josse, S. Le, and J. Mazet, "FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining." 2016.
- [9] D. Adler, D. Murdoch, and others, "rgl: 3D Visualization Using OpenGL." 2016.
- [10] M. Nakazawa, "fmsb: Functions for Medical Statistics Book with some Demographic Data." 2015.
- [11] H. Wickham, *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2009.
- [12] L. J. Williams and H. Abdi, "Principal Component Analysis," *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, vol. 2, no. 4, pp. 433–459, 2010.
- [13] ASTM D4814–16A, "Standard Specification for Automotive Spark-Ignition Engine Fuel," no.

February, pp. 1–31, 2014.

- [14] Worldwide Fuel Charter Committee, “Worldwide Fuel Harmonisation,” 2013.
- [15] CRC Volatility Group, “CRC Report No . 666 2013 CRC INTERMEDIATE- TEMPERATURE E15 COLD-START AND WARM-UP VEHICLE DRIVEABILITY PROGRAM Final Report,” Alpharetta, 2014.
- [16] CRC Volatility Group, “CRC Report No. 668 2014 CRC HOT-FUEL-HANDLING PROGRAM Final Report,” Alpharetta, 2015.
- [17] V. Bazán-Salazar, “CALIDAD DEL DIESEL DE COSTA RICA ENTRE LOS AÑOS 2006-2010,” *Rev. Cienc. y Tecnol.*, vol. 31, no. 2, pp. 37–51, 2016.
- [18] V. Bazan-Salazar, “CALIDAD DE LA GASOLINA REGULAR DE COSTA RICA ENTRE LOS,” *Rev. Cienc. y Tecnol.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–17, 2017.
- [19] U.S. Energy Information Administration, “U.S. Exports to Costa Rica of Conventional Motor Gasoline,” 2017. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/>.

AGRADECIMIENTO

Un sincero agradecimiento a los colegas del Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ) quienes con su experiencia proporcionaron una ayuda invaluable a la investigación, al Dr. Carlos León por su apoyo y respaldo en la realización de la presente investigación y a la Sra. Marta Valverde por valiosa ayuda para entender la evolución del Programa de Calidad de los Combustibles desde sus inicios.