

# INDICE DE CARGA CONTAMINANTE PARA LOS VERTIMIENTOS GENERADOS DURANTE EL PROCESO DE REFINACIÓN QUÍMICA DE ORO EN LOS TALLERES DE JOYERÍA DE BUCARAMANGA

## CONTAMINATION CHARGE INDEX FOR THE WASTEWATER PRODUCED DURING THE GOLD AND SILVER CHEMICAL REFINEMENT PROCESS IN THE JEWELRY WORKSHOP OF BUCARAMANGA

MÍRLEY MINDIOLA

*Ingeniera Química, Universidad Industrial de Santander, mirleymindiola@hotmail.com*

JULIO PEDRAZA

*Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, jpedraza@uis.edu.co*

HUMBERTO ESCALANTE

*Profesor Titular, Escuela Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, escala@uis.edu.co*

Recibido para revisar Septiembre 03 de 2007, aceptado Abril 11 de 2008, versión final Mayo 06 de 2008

**RESUMEN:** El objetivo del presente trabajo fue evaluar la carga contaminante presente en los efluentes líquidos que se generan durante el proceso de refinación química de oro y de plata con ácido nítrico. Para tal fin se diseñó una herramienta matemática denominada Índice de Carga Contaminante (ICC), que permite valorar de manera cualitativa y cuantitativa la contaminación generada por dichos vertimientos. Para el diseño del ICC se tuvo en cuenta las variables cuantificadas en los efluentes, su efecto contaminante diferente, y su nivel de toxicidad y/o peligrosidad. Para el desarrollo de la herramienta se contó con información de campo, obtenida a partir de un muestreo realizado a un grupo representativo de talleres, de este sector industrial de la ciudad de Bucaramanga. Con el cálculo del ICC el grupo de talleres en estudio se ubicó en un rango de calificación de calidad ambiental entre muy mala y pésima, corroborando la hipótesis de que los efluentes generados por este sector industrial necesitan de manera urgente un tratamiento de remediación.

**PALABRAS CLAVE:** Refinación de Oro, Índices de Calidad del Agua, Vertimientos, Metales Pesados.

**ABSTRACT:** The objective of the present work was to evaluate the polluting load of the liquid effluents of the process of chemical gold refinement and silver with nitric acid, that factories of jewelry shop in Bucaramanga and their metropolitan area generate, and that without no type of previous treatment are spilled to the sewage system network I publish. For such aim a tool was designed to calculate an Index of Polluting Load (ICC), that allows to value qualitatively as much as quantitatively the contamination generated by these wastewater. With the calculation of the ICC the group of factories in study was located in a rank of very bad qualification between and terrible environmental quality, corroborating the hypothesis that this industrial sector needs urgent way a treatment of remediation for its spills.

**KEY WORDS:** Refinement of Gold, Heavy Indices of Quality of the water, Wastewater, Metals.

## 1. INTRODUCCIÓN

La elaboración de joyas requieren de oro y plata con bajo contenido de impurezas, por tal razón el artesano joyero realiza a la materia prima un Proceso de Refinación Química con Ácido Nítrico (PROPAN); conocido comúnmente en el sector de la joyería como *purificación*. Estos procesos generan emisiones de NOx y efluentes líquidos con un gran contenido de iones metálicos [1].

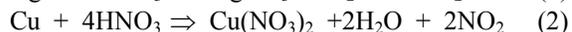
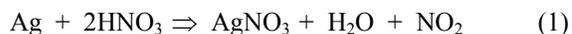
Los talleres de refinación de oro y de plata, están ubicados dentro del casco urbano de las ciudades. Los procesos de purificación son realizados de forma artesanal y los efluentes no reciben ningún tratamiento previo antes de ser vertidos directamente a la red de alcantarillado público o lotes vecinos, ocasionando problemas de contaminación ambiental [2]. En Bucaramanga y su área metropolitana, según informes del Centro de Desarrollo Productivo de Joyería (CDP), en el año 2001 se encontraban registrados 27 talleres con un producido promedio mensual de 4000 kg de oro y de plata refinados con ácido nítrico [3].

La caracterización físico química de los efluentes, procedentes de talleres que realizan el PROPAN, reportan valores de concentración de iones metálicos de Cobre, de Plata, de Aluminio, de Sodio, de Zinc, de Níquel, y de pH, que sobrepasan la normatividad ambiental [2]. Los resultados de la caracterización fisicoquímica, por si solos no muestran el grado de contaminación que estos efluentes puede estar ocasionando. Por lo anterior es necesario diseñar y construir una herramienta, que permita correlacionar entre si las variables medidas, para predecir con un buen nivel de exactitud el grado de contaminación que puede llegar a ocasionar los vertimientos de los talleres que refinan oro y plata con ácido nítrico.

El objetivo principal de este trabajo de investigación fue evaluar la carga contaminante que ocasionan los vertimientos líquidos del PROPAN. Se diseñó una herramienta matemática denominada “Índice de Carga Contaminante” (I.C.C), tomando como base teórica modelos matemáticos para evaluar índices de calidad de aguas superficiales. Los Indicadores Ambientales (IA) son medidas de

factores físicos, químicos y biológicos, que mediante una escala cualitativa representan el nivel de la calidad de un efluente, con respecto a la normatividad, a la toxicidad, y a la amenaza ambiental que este implique. Los datos experimentales para el estudio se obtuvieron de un muestreo realizado a un grupo de 6 talleres de la ciudad de Bucaramanga, que realizan artesanalmente el PROPAN.

El PROPAN [1], que se esquematiza en la figura 1, se fundamenta en la capacidad del ácido nítrico para diluir los metales que acompañan el oro, cuando estos están presentes en una proporción 1-3. El proceso involucra en primer término someter el oro a una operación de encuartación, en proporción 1-2 o 1-4 con cobre o con plata para obtener una aleación entre 250 y 285 milésimas de contenido de oro. Los metales se funden en un crisol a una temperatura aproximada de 1100°C. La aleación caliente se vierte en agua a 25°C y por choque térmico se obtienen pequeños gránulos de metal aleado, con una elevada área superficial. Posteriormente la plata ó el cobre, presentes en la aleación, se disuelven con ácido nítrico a 25°C, como se describe en las siguientes reacciones:



En esta etapa se producen vapores de óxidos nitrosos, cuyo cese indica la culminación de la digestión. Para que el ataque químico sea completo, los joyeros realizan una segunda digestión con ácido nítrico en caliente. El oro seco se funde a 800°C, agregando sal de nitro ó bórax como fundente para disminuir su punto de 1070°C a unos 800-900°C. El lingote de oro resultante tiene de 99.7% a 99.8 % de pureza. En esta etapa se genera una disolución con elevada concentración de nitratos de plata y de cobre. Algunos talleres vierten estos efluentes directamente a la red de alcantarillado, en otros casos se acumulan y mediante la adición de NaCl recuperan la plata como lo indica la siguiente reacción:



Por decantación se separa el cloruro de plata de la solución de nitrato de cobre y de nitrato de

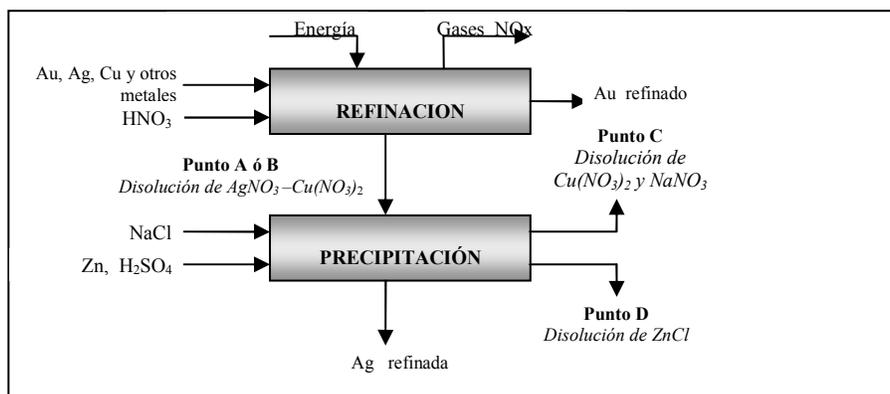
sodio. El cloruro de plata se lava hasta eliminar la acidez y es reducido a plata metálica con ácido sulfúrico al 20% , con la adición de viruta de zinc; la reacción que tiene lugar es:



En esta etapa se produce una solución residual que contiene cloruro de zinc. A la plata metálica se le realiza un fundido y afinado a 900°C, con el objeto de refinarla.

Mediante las visitas a los talleres y el estudio teórico del PROPAN, se identificaron los puntos del proceso que generan vertimientos altamente contaminantes. A estos puntos se les realizó un muestreo periódico y se les denominó así:

- *Punto A:* disolución procedente de la digestión química. Cuando el joyero estima que no amerita recuperar la plata, este efluente se vierte al alcantarillado.
- *Punto B:* disolución A cuando es acumulada con el objetivo de recuperar posteriormente la plata.
- *Punto C:* efluente residual después haber realizado la precipitación de la plata, con cloruro de sodio, al efluente B.
- *Punto D:* efluente vertido después de agregar viruta de zinc y ácido sulfúrico.



**Figura 1.** Proceso de Refinación de Oro y de Plata con Ácido Nítrico  
**Figure1.** Gold and Silver Refinement Process with Nitric Acid

### 1.1 Indicadores medioambientales

Los indicadores ambientales son medidas de factores físicos, químicos y biológicos, que mediante una escala cualitativa representan el nivel de la calidad de un efluente, con respecto a la normatividad, toxicidad, y la amenaza ambiental que éste implique.

Un “Índice de Calidad del Agua” (ICA), es un sistema indicador de la calidad del agua, y agrupa los parámetros contaminantes más representativos dentro de un marco unificado, como un instrumento que permite equiparar el deterioro o la mejora en la calidad de un cuerpo de agua [4].

Landwehr (1974) [5], abordó el tema de los ICA y para tal efecto estudió los trabajos, realizados

por Horton (1965) [5] y Liebman (1969) [5] quienes son los pioneros en el intento de generar una metodología unificada para el cálculo del ICA. La Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) realizó un estudio para evaluar el ICA con base en nueve parámetros. Pratti (1971) [6] llevó a cabo un trabajo con trece parámetros y Dinius (1972) [7] realiza otro similar con once parámetros. En México, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (1974) [8], para el estudio limnológico del lago de Chapala estructuró un modelo para el cálculo del ICA con doce parámetros.

Brown (1970) [9] propuso que la selección y agrupación de las variables a tenerse en cuenta, en el diseño de una herramienta para cuantificar el índice de contaminación, podría hacerse por

orden de importancia ya fuese mediante un criterio de sumatorias ó multiplicativo. Landwehr y Denninger (1976) [5] demostraron que para el cálculo de un Índice de Calidad las técnicas multiplicativas son más sensibles que las aritméticas a la variación de los parámetros. Ott (1978) [10] indica que el asignar pesos específicos a los parámetros introduce cierto grado de subjetividad en la evaluación del índice; sin embargo recomienda una asignación racional y unificada de pesos de acuerdo al uso del agua y de la importancia de los parámetros. Dinius (1987) [7] para el diseño de un ICA utilizó el método Delphi de encuestas; agrupó a un panel de expertos en temáticas ambientales y diseñó un ICA de tipo multiplicativo y con asignación de pesos específicos por parámetro.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El estudio se realizó en tres etapas:

### 2.1 Estudio teórico práctico del PROPAN

De la base de información del CDP de Joyería de Bucaramanga, se seleccionaron 6 talleres como muestra representativa. El CDP asignó un código a cada taller para proteger su identidad y

conservar la confidencialidad de la información. Para estudiar y definir el PROPAN se realizaron visitas a los talleres, identificando que ningún procesos está estandarizado. Las cantidades de reactivos son manejados a criterio del artesano; dado que no se dispone de equipos de medición adecuados. En la figura No 1 se esquematiza el proceso con los efluentes del estudio.

### 2.2 Caracterización fisicoquímica de los efluentes del PROPAN

En los 6 talleres se recolectaron muestras de 400 ml de cada uno de los efluentes, correspondientes a los puntos A, B, C y D de la figura 1. Adicionalmente se registro la información que se indica en la tabla 1.

Para evaluar la calidad de los efluentes del PROPAN se seleccionaron las variables: la concentración de metales en solución, el pH, la acidez, la conductividad, la turbidez, el contenido de sólidos disueltos, de sólidos suspendidos y de oxígeno disuelto. No se consideraron los parámetros de tipo orgánico y biológico debido a la naturaleza de los efluentes. Los niveles de concentración mínimos permitidos para cada variable, se definieron a partir de la normatividad ambiental fijada por la legislación colombiana en el decreto 1594 de 1984 [12].

**Tabla 1.** Condiciones de Operación del Proceso de Refinación de Oro y de Plata Con Ácido Nítrico Realizado por los Talleres de Joyería

**Table 1.** Operation Conditions of the Gold and Silver Process of Refinement with Nitric Acid Realized by Jewelry Workshop

Parámetro	Taller					
	000	002	003	006	203	550
Material a refinar	Retal	Au (18k)	Au-Ag	Au (18k)	Au (18k)	Au (10k)
Peso de material a refinar (gr)	48.3	210	124	356.3	N.I	27.8
Peso de cobre adicionado (gr)	96	400	N.I	1000	30.8	53.6
Volumen (ml) de HNO <sub>3</sub> adicionado	435	6000	900	Exceso	300	425
Tiempo de la reacción (min)	30	2400	15	180	30	20
Peso de material refinado (gr)	20.17	122	10	N.I	3.7	13.5
Volumen (l) de efluente acumulado	168(2)	128(2)	20	10	N.I	N.I
Tiempo de reacción (min)	N.I	N.I	30	30	N.I	N.I
Peso de NaCl (gr)	N.I	N.I	3000	500	N.I	N.I
Periodicidad del vertimiento	20 Días	Mes	Semanal	Diario	20 Días	3 Meses

NI = No Informó.

La caracterización fisicoquímica de las muestras se realizó de acuerdo a las normas ASTM utilizando equipos especializados como Conductímetro 712 Metrohm, Turbidímetro DRT-15 CE, Espectrofotómetro Perkin Elmer, Titulador Automático Titrino 7516pa Metrohm y Oxímetro Schott Postlach 2480.

En la tabla 2 se presenta un ejemplo de la caracterización fisicoquímica de los efluentes. No en todos los talleres fue posible tomar muestra en los puntos A, B, C y D, debido a que los procesos no están estandarizados y su operación es dependiente de la masa de metales a purificar.

Se observa que los parámetros se encuentran en rangos diversos y exhiben valores elevados que sobrepasan excesivamente los límites establecidos por la normatividad ambiental. Todas las muestras presentaron valores de pH de uno; indicando su carácter predominantemente ácido. Los valores elevados de conductividad denotan la presencia de iones en solución. La concentración de sólidos disueltos y sólidos suspendidos fue baja, sin llegar en ningún caso a exceder los límites de permisividad.

**Tabla 2.** Caracterización fisicoquímica de los efluentes del proceso de refinación de oro y de plata  
**Table 2.** Physical and Chemical Characterization of Gold and Silver Refinement Process Effluents

Taller	Punto de muestreo	Acidez (ppmCaCO <sub>3</sub> )	Cobre (ppm)	Plata (ppm)
000	A	166625,92	51800	27223,5
002	A	222675,09	40260	1480
	B	68,047	18680	2932
003	A	68670,84	2916,4	24980
	C	61362,16	1379,2	7,98
	D	37790,16	288	2,8
006	A	429909,8	361720	8444
	C	54103,5	2978,4	3,03
	D	87678,2	283,9	1,87
203	A	395312,5	130750	40,035
550	A	421403,89	91933,2	13200
Límite permisible según la Normatividad Colombiana [12]		0	3	0,5

### 2.3 Diseño del Índice de Carga Contaminante (ICC)

La calidad ambiental del efluente es afectada por la toxicidad y peligrosidad de cada variable. Para

el diseño del “Índice de Carga Contaminante” (ICC) se asignó para cada variable un Peso de Incidencia Ambiental (PIA), definido como una fracción  $w_i$ , como se muestra en la ecuación 5 [13]:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \tag{5}$$

Las variables se agruparon por categorías, de acuerdo al nivel de toxicidad que reporta la Organización Mundial de la Salud “O.M.S”, (Southwest Pollution Prevention Center, 1998); definiéndose nueve grupos de importancia (GDI) [13]. En la Tabla 3 se presenta los GDI con el respectivo  $w_i$  asignado.

**Tabla 3.** Grupos de Importancia y sus Respectivos Valores de Incidencia  $w_i$

**Table 3.** Groups of Importance and their Respective Values of Incidence  $w_i$ .

GDI	Variable	$w_i$
I	pH, Acidez	0.2
II	Temperatura	0.05
III	Conductividad	0.05
IV	Oxígeno Disuelto	0.05
V	Turbidez, Sólidos	0.05
VI	Metales Altamente Tóxicos (Cd)	0.25
VII	Metales Tóxicos (Cu,Pb,Ag)	0.20
VIII	Metales Medianamente Tóxicos (Ni)	0.10
IX	Metales Ligeramente Tóxicos (Al, Zn, Fe ,Au ,Na)	0.05

Para dar una categoría de calidad a cada variable con respecto a las demás, y evaluar su incidencia particular sobre la calidad global del vertimiento, se elaboró una Escala Estándar de Calificación (EEC) cualitativa y cuantitativa a partir de tres niveles: a) *Valor de Emisión Ideal*: se calificó con una calidad del 100%, correspondiente a una calificación de EXCELENTE, b) *Valor de Emisión Normal*: corresponde al valor máximo permisible por la normatividad ambiental y se asignó una calificación del 50%,

Y c) *Valor de Emisión Contaminante*: cuando la variable excede 50 veces el máximo nivel permisible; se calificó con un porcentaje de calidad del 0% y se define como un efluente PESIMO. Los espaciamentos de la escala se definieron a partir de las siguientes consideraciones [10]:

Inadecuado :2 veces por encima de la norma

- ✓ Deficiente :5 veces por encima de la norma
- ✓ Malo :10 veces por encima de la norma
- ✓ Muy malo : 20 veces por encima de la norma

En la tabla 4 se presenta la escala cualitativa-cuantitativa para evaluar la calidad “Q” de cada variable.

**Tabla 4.** Descriptores de Calidad para los Índices de Contaminación de los Efluentes

**Table 4.** Quality Descriptors to the Contamination Index of Effluents

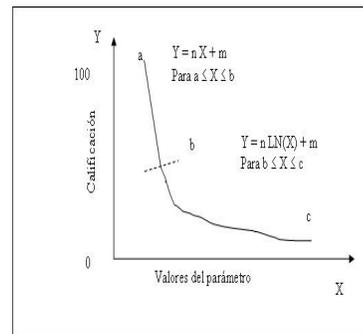
Valoración	Calidad
0	Pésimo
10	Muy malo
20	Malo
30	Deficiente
40	Inadecuado
50	Normal
60	Aceptable
70	Eficiente
80	Bueno
90	Muy bueno
100	Excelente

A partir de los valores cuantitativos obtenidos en la caracterización fisicoquímica se definió el modelo matemático para describir el nivel de calidad “Q” de cada una de las variables. Se diferenciaron dos rangos de operación, descritos por modelos matemáticos simples. En el primer rango la diferencia entre el valor ideal y el máximo valor permisible están muy cercanos, y corresponde a modelo lineal. En el segundo rango la diferencia entre el valor máximo permisible y los valores obtenidos en la

caracterización es muy amplia, es descrito por un modelo de curva.

La Figura 2 presenta una gráfica tipo para el comportamiento de las variables en relación con los descriptores de calidad. Los puntos “a” y “c” corresponden al límite superior e inferior respectivamente, en la escala de calificación estándar. El punto de inflexión “b”, calificación del 50%, corresponde al límite permisible por la normatividad ambiental.

En la tabla 5 se presentan la descripción matemática para cada variable, mediante ajuste gráfico en Microsoft Excel, aceptando su validez para correlaciones que estuviesen dentro del intervalo  $0.99 \leq R^2 \leq 1.00$ .



**Figura 2.** Modelo gráfico para el comportamiento de las variables de estudio

**Figure 2.** Graphic model for the behaviour of studied variables

Por consiguiente el ICC se definió como un modelo matemático que involucra la calidad promedio del efluente  $\overline{Q_i}$  y los pesos de incidencia ambiental de las variables comprometidas  $w_i$ , y se expresó como [14]:

$$ICC = \sum_{i=1}^n w_i \overline{Q}_{ij} \quad (6)$$

Donde:

$\overline{Q}_i$  : calidad promedio del parámetro (0-100)

$w_i$  : peso asignado a cada grupo

$n$  : número total de grupos

$j$  : Grupo de importancia

**Tabla 5.** Ecuaciones para calcular los Descriptores de Calidad  
**Table 5.** Equations to calculate the Quality Descriptors

Variable	Ecuacion Rango Superior	Ecuacion Rango Inferior
pH : (pH)	$Q_{pH} = 10 \text{ pH} - 10$	$Q_{pH} = \text{No aplica}$
Acidez : (AC)	$Q_{AC} = -1,0017AC + 49,342$	$Q_{AC} = 0$
Temperatura : (T)	$Q_T = 27,318 \text{ Ln}(T) - 4,9556$	$Q_T = -5,3425T + 209,45$
Conductividad : (CT)	$Q_{CD} = -54,883 \text{ Ln}(CT) + 186,43$	$Q_{CD} = -4,0059CT + 97,033$
Turbidez: (TB)	$Q_{TB} = -12,861 \text{ Ln}(TB) + 70,376$	$Q_{TB} = -10TB + 100$
Oxígeno disuelto: (Ox)	$Q_{OX} = 10 * OX$	$Q_{OX} = 10 * OX + 50$
Sólidos disueltos: (SD)	$Q_{SD} = -12,861 \text{ Ln}(SD) + 138,52$	$Q_{SD} = -0,05SD + 100$
Sólidos suspendidos: (SS)	$Q_{SS} = -12,861 \text{ Ln}(SS) + 129,6$	$Q_{SS} = -0,1SS + 100$
Plata: (Ag)	$Q_{Ag} = -12,861 \text{ Ln}(Ag) + 40,763$	$Q_{Ag} = -100Ag + 100$
Cobre: (Cu)	$Q_{Cu} = -12,861 \text{ Ln}(Cu) + 63,806$	$Q_{Cu} = -16,667Cu + 100$
Hierro: (Fe)	$Q_{Fe} = -12,861 \text{ Ln}(Fe) + 91,074$	$Q_{Fe} = -2Fe + 100$
Zinc: (Zn)	$Q_{Zn} = -12,861 \text{ Ln}(Zn) + 79,29$	$Q_{Zn} = -5Zn + 100$
Níquel: (Ni)	$Q_{Ni} = -7,996 \text{ Ln}(Ni) + 56,54$	$Q_{Ni} = -25Ni + 100$
Plomo: (Pb)	$Q_{Pb} = -12,861 \text{ Ln}(Pb) + 40,763$	$Q_{Pb} = -100Pb + 100$
Cadmio: (Cd)	$Q_{Cd} = -12,861 \text{ Ln}(Cd) + 20,065$	$Q_{Cd} = -500Cd + 100$
Aluminio: (Al)	$Q_{Al} = -12,861 \text{ Ln}(Al) + 70,376$	$Q_{Al} = -10Al + 100$
Sodio: (Na)	$Q_{Na} = -12,861 \text{ Ln}(Na) + 117,82$	$Q_{Na} = -0,25Na + 100$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de las ecuaciones de la tabla 6 se determinaron los valores de calidad “Q” para cada variable en los diferentes puntos de muestreo del proceso y para cada uno de los talleres. Los parámetros de calidad “Q” ofrecen una perspectiva general del nivel contaminante que presenta cada efluente, dependiendo del estado de las variables que conforman cada GDI. Por tal razón es necesario para el problema en estudio, visualizar este efecto tanto por taller como por punto generador de vertimiento en el PROPAN Para los GDI I, II y III el parámetro de calidad Q es constante en todos los puntos de muestreo, como se observa en la tabla 6.

El análisis de estos resultados indica:

- El valor de Q igual a cero obtenido para el GDI I, en todos los talleres, revela una pésima calidad ambiental de los efluentes con respecto al pH y a la acidez. Esta situación es consecuencia del exceso de ácido nítrico que adicionan los artesanos, durante las etapas de digestión química de las muestras de oro y de plata.

**Tabla 6.** Parámetro de calidad Q para los grupos de variables I, II y III

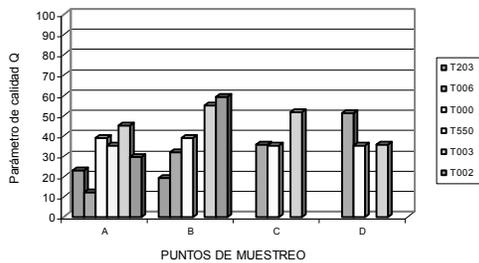
**Table 6.** Quality Parameters: Q for the variable groups I, II and III

TALLER	Q		
	I	II	III
203	0	75.887	0
006	0	75.887	0
000	0	75.887	0
550	0	75.887	0
003	0	75.887	0
002	0	75.887	0

- El Q para el GDI II se mantiene constante en todos los casos con un valor de 75.887, indicando que la temperatura se encuentra en un rango de calificación entre eficiente y bueno. Estos efluentes se vierten a la red de alcantarillado urbano a temperatura de 25°C, y no llegan a superar los límites permitidos por la normatividad. Por lo tanto el GDI

- II no contribuye al impacto ambiental generado por los efluentes del PROPAN.
- Los valores de Q correspondientes al GDI III, se mantienen constantes en todos los casos con un valor de 0.0, indicando una pésima calidad ambiental de los efluentes con respecto la conductividad eléctrica. Las causas de esta situación son la alta concentración de iones  $H^+$  y las sales disueltas en los efluentes, consecuencia de las reacciones del cobre y de la plata con el ácido nítrico, dando lugar a la producción de nitrato de cobre y de plata respectivamente.

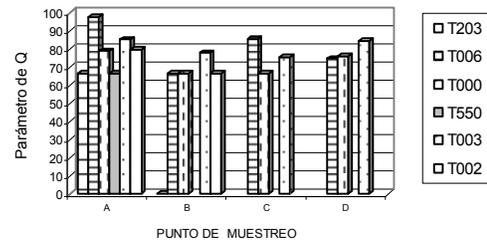
Los valores de “Q” para las variables presentes en los GDI IV, V, VI, VII, VIII y IX, fue bastante versátil, lo que indica que las concentraciones de estos parámetros influyen significativamente en el nivel de contaminación que ocasiona el efluente. Para realizar el análisis de este tipo de GDI se realizaron graficas de Q vs punto de muestreo para cada taller.



**Figura 3.** Parámetros de calidad Q para el grupo de variables IV  
**Figure 3.** Quality Parameters: Q for the variables of group IV

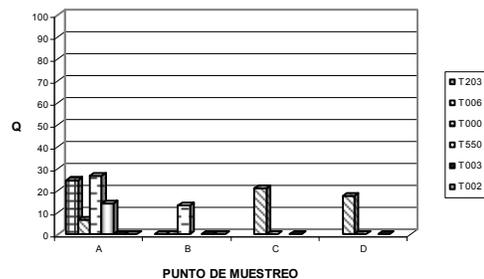
En la figura 3, se observa un comportamiento bastante inestable para el GDI IV, que corresponde al oxígeno disuelto. En algunos casos puede calificarse el vertido como normal y en otros casos como muy malo. La concentración de oxígeno disuelto más baja la exhibe el punto de muestreo A, mientras que la más alta se obtiene en el punto B. Los efluentes correspondientes al taller código 003 poseen una alta concentración de oxígeno disuelto, debido a que esta variable está directamente relacionada con la concentración de iones presentes en la

solución. La respuesta de los diferentes talleres no es igual, debido a que los procesos no están estandarizados.



**Figura 4.** Parámetros de calidad Q para el grupo de variables V  
**Figure 4.** Quality Parameters: Q for the variables of group V

En la figura 4 se observa para el GDI V, conformado por las variables turbidez, sólidos disueltos y sólidos suspendidos, una calificación para el Q en el rango eficiente y excelente, lo cual indica la escasez de partículas en suspensión ó materia coloidal en los vertimientos generados del PROPAN. Sin embargo, en algunos casos y precisamente debido a las prácticas operativas del artesano joyero, al no utilizar los tanques de almacenamiento exclusivamente para los vertimientos, sino que albergan cualquier cantidad de partículas ajenas al proceso y sin la limpieza adecuada, el efluente se ve incrementado en la concentración de sólidos, dando lugar a una situación como la observada para el taller 203 en el punto de muestreo B.



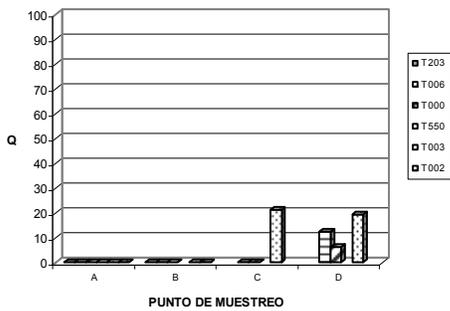
**Figura 5.** Parámetros de calidad Q para el grupo de variables VI  
**Figure 5** Quality Parameters: Q for the variables of group VI

El GDI VI lo conforma el cadmio, metal clasificado según la EPA como altamente tóxico. Los valores de Q para este grupo de incidencia

se encuentran entre los rangos de calificación pésimo e ineficiente, como se infiere de la figura 5, indicando que el cadmio es un compuesto con alta relevancia en la carga contaminante generada por los efluentes del PROPAN, aunque se encuentra en menor proporción comparado con otros metales presentes en los vertidos.

La presencia de esta especie metálica en los efluentes se debe a la composición de la materia prima, ya que ésta proviene en la mayoría de los casos de retal de joyería al cual se le han hecho aleaciones para la elaboración de la joya.

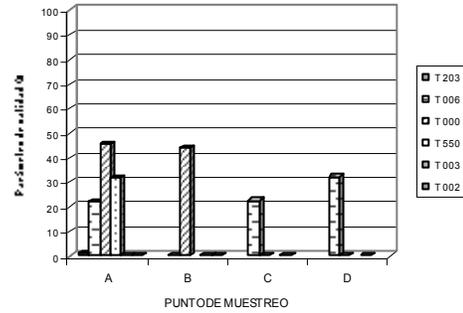
El aumento en la concentración de cadmio en algunos casos para los puntos de muestreo C y D, del taller 006, puede ser por la presencia de impurezas en los recipientes de trabajo, y por la presencia de viruta de cinc, utilizada en el proceso para la recuperación de la plata.



**Figura 6.** Parámetros de calidad Q para el grupo de variables VII

**Figure 6.** Quality Parameters: Q for the variables of group VII

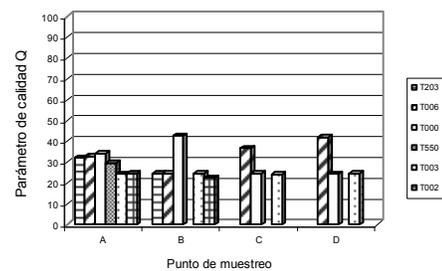
En la figura 6 se ha representado la calidad Q para el GDI VIII, grupo conformado por los metales plata, cobre y plomo, los cuales han sido clasificados por la EPA como tóxicos. En la figura se observa que los efluentes del PROPAN, debido a las elevadas concentraciones de estos metales, presentan una calidad pésima para los puntos de muestreo A y B; sin embargo para los puntos C y D, la calidad del efluente alcanza la calificación de malo, debido a que los artesanos joyeros han realizado la recuperación de la plata con NaCl, reduciendo de esta manera la concentración de este metal en los vertidos.



**Figura 7.** Parámetros de calidad Q para el grupo de variables VIII

**Figure 7.** Quality Parameters: Q for the variables of group VIII

El níquel es un metal clasificado por la EPA como medianamente tóxico, y en este caso constituye la variable del GDI VIII, representada en la figura 7; donde se observa que la concentración de este metal en los vertidos tiene un comportamiento muy inconstante, excepto para los talleres de códigos 203, 003 y 002, donde los puntos de muestreo se ubican en la calificación de pésimo. Esta situación se debe a que el oro que refinan estos talleres, procede de joyas en mal estado, las cuales poseen algún recubrimiento en níquel. La concentración más alta de níquel se presenta en el punto B, debido a que este punto de muestreo esta conformado por los acumulados de los efluentes de varios procesos de refinación.

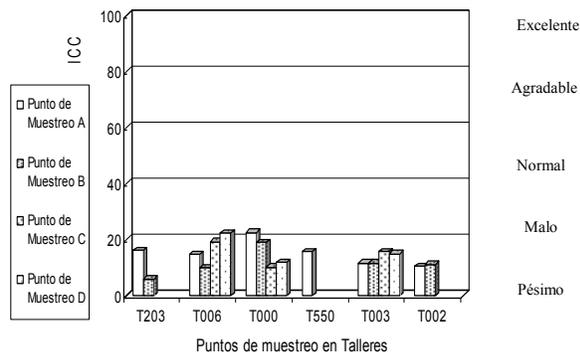


**Figura 8.** Parámetros de calidad Q para el grupo de variables IX

**Figure 8.** Quality Parameters: Q for the variables of group IX

Los metales clasificados como ligeramente tóxicos, se encuentran agrupados en el GDI IX, constituido en este caso por el aluminio, el cinc, el hierro y el sodio. La calidad del grupo GDI en los efluentes del PROPAN, como se observa en la figura 8, presenta un comportamiento versátil entre los diferentes puntos de muestreo, abarcando un rango que va desde malo hasta casi alcanzar el calificativo de normal.

Los parámetros de calidad "Q" sólo permiten tener una apreciación particular del efecto contaminante de las diferentes variables. Con los valores de  $w_i$  y de Q se calculó el ICC, según el modelo planteado en la ecuación 6. En la figura 9, se presentan los valores de ICC para los diferentes puntos de vertimiento de los talleres que realizan el PROPAN.



**Figura 9.** Índice de Contaminación en cada punto de muestreo para los talleres que realizan el proceso de refinado de Oro y de Plata con ácido Nítrico

**Figure 9.** Contamination Index for each Sampling Point of the Jewelry Workshop that made Gold and Silver Refinement Process with Nitric Acid

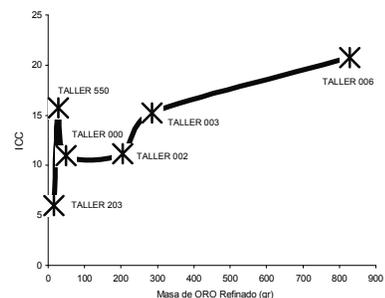
Los ICC calculados para los efluentes del PROPAN, que realizan los talleres de joyería de Bucaramanga y su área metropolitana, permiten clasificar estos vertimientos como pésimos y en pocos casos alcanzan la calificación de malos, indicando de esta manera que su poseen una alta carga contaminante y que al ser vertidos a la red de alcantarillado urbano, están ocasionando un grave problema de contaminación ambiental.

La anterior conclusión indica la necesidad de plantear tecnologías para el tratamiento de los efluentes del PROPAN, así como la estandarización del proceso.

Los puntos de muestreo B son los que exhiben la más baja calidad ambiental, debido a que estas soluciones están conformadas por la mezcla acumulada de los efluentes de varios procesos de refinación; acrecentado la concentración de cobre, de plata, de hierro, de zinc, de níquel, de plomo, de cadmio, de aluminio y de sodio.

Los puntos de muestreo C y D en teoría deberían ser los menos incidentes en la carga contaminante, puesto que se les ha realizado previamente la recuperación de la plata, sin embargo ocurre todo lo contrario debido a que en esta etapa se ha adicionado al efluente grandes cantidades de  $H_2SO_4$ , Zinc, y NaCl.

Debido a que el proceso de Refinación de Oro y de Plata no está estandarizado en ninguno de los talleres, los artesanos agregan volúmenes de ácido nítrico en exceso y sin relación con la masa de material a tratar; esta situación crementa el problema de contaminación ambiental. En la figura 10 se presenta la relación de oro refinado con respecto al ICC de los efluentes de cada taller.



**Figura 10.** Relación entre el Índice de Contaminación y la capacidad de refinación de Oro que realiza el taller

**Figure 10.** Relation between the Contamination Index and the Capacity of Refinement of Gold to Achievement by Jewelry Workshop

Se observa una gran variación de la carga contaminante entre el grupo de talleres en estudio. Aún cuando algunos talleres manejan un mismo nivel de producción, de lo cual se infiere que el grado de contaminación generado por un taller es totalmente independiente del volumen de producción del mismo, y por el contrario sí depende de las prácticas operativas del artesano joyero; las cuales pueden clasificarse así:

- CASO I: Talleres que solamente realizan la etapa de digestión química y vierten directamente la solución resultante, denominada como punto de muestreo A.
- CASO II: Talleres que solamente realizan la etapa de digestión química y acumulan la solución resultante de varias refinaciones para luego ser desechada, a esta solución acumulada se le ha denominado punto de muestreo B.
- CASO III: Talleres que además de realizar el proceso de refinación química del oro con ácido nítrico acumulan las soluciones (punto de muestreo B), con el propósito de recuperar la plata que contienen, generándose los efluentes correspondientes a los puntos de muestreo C y D, que son los que realmente se vierten en este caso.

Teniendo en cuenta estas tres situaciones, se observa que el CASO I se presenta en el taller código 550, el CASO II en los talleres con código 203 y 002 y el CASO III, en los talleres código 006, 000 y, 003, es necesario destacar que ninguno de los talleres visitados realiza algún tipo de tratamiento a sus efluentes líquidos antes de ser vertidos.

#### 4. CONCLUSIONES

Para evaluar el impacto ambiental que ocasionan los efluentes del Proceso de Refinación de Oro y de Plata mediante Ácido Nítrico (PROPAN), se diseñó una herramienta matemática, denominada Índice de carga Contaminante (ICC).

El ICC se diseñó como función de la calidad y el peso que cada una de las variables físicas y químicas, utilizadas para la descripción de un efluente, pueden llegar a ejercer sobre el grado de contaminación que el vertimiento puede ocasionar. Para esto se planteó una escala cuantitativa – cualitativa que permite, mediante una calificación evaluar la contribución a la calidad del efluente, que aporta en forma individual y grupal cada una de las variables en estudio.

Los índices de carga contaminante (ICC) calculados para el proceso de refinación química de oro y plata con ácido nítrico (PROPAN), realizado en los talleres de joyería de Bucaramanga y su área metropolitana, permiten calificar a sus efluentes como *pésimos* y en pocos casos alcanzan la calificación de *malos*, corroborando de esta manera la alta carga contaminante presente en estos vertidos y la urgente necesidad de realizarles un tratamiento de remediación, antes de ser dispersados en la red urbana de alcantarillado de la ciudad.

En Bucaramanga los joyeros realizan el PROPAN, en forma empírica, incidiendo directamente en la carga contaminante de los vertidos debido a la falta de control sobre las variables, especialmente las que involucran pesos y volúmenes; por lo tanto se visualiza la necesidad de estandarizar estos procesos.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación y la colaboración prestada por las siguientes instituciones para el desarrollo del presente trabajo:

- COLCIENCIAS
- Centro de Desarrollo Productivo de Joyería (CDP)
- Corporación para la defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB)

#### REFERENCIAS

- [1] Centro de Desarrollo Productivo de joyería. Informe: “Guía para la evaluación de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico”. Bucaramanga. 2001.
- [2] PRADA RAMÍREZ, IVÁN. Diagnóstico tecnológico y de Impacto Ambiental en la Refinación de Oro y Plata en Bucaramanga. Especialización en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1998.

- [3] SANABRÍA SUESCÚN, OLGA JOHANA. Estudio de los vertimientos líquidos producidos por la industria de la joyería en Bucaramanga, Especialización en Ingeniería Ambiental. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, 2000.
- [4] ESPINOZA, GUILLERMO. Fundamentos de evaluación de impacto ambiental. Banco interamericano de desarrollo. Santiago-Chile. 2001.
- [5] LANDWHER, J. and DENNINGER, R. "Comparison of several water quality indices". Water Pollution Control. Vol. 48 N°5. Pág. 954-958. 1976.
- [6] PRATTI, L. PAVANELLO, R. "Assessment of surface water quality by a single index of pollution. Water resources research. Vol. 5. May 1971. pp. 456-467.
- [7] DINIUS, S.H. "Design of a water quality index". Water Resources Bulletin. Vol. 23 N°5. Pág. 833-843. 1987.
- [8] LEON VIZCAINO, LUIS. "Índices de calidad del agua (IVCA), forma de estimarlos y aplicación en la cuenca de Lerma-Chapala". Instituto mexicano de tecnología del agua. México. 1988.
- [9] BROWN, R., (1970). "A Water Quality Index - Do We Dare?", Water Sewage Works 11, pp. 339-343.
- [10] OTT, W.R. Environmental indices, theory and practice. A.A Science. Ann Arbor. Michigan. 1978.
- [11] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. Cincinnati, Ohio. USA 1983.
- [12] DECRETO 1594 DEL 26 DE JUNIO DE 1984. Ministerio de Agricultura. Colombia.
- [13] CANTER, LW. Manual de Evaluación de Impacto Ambiental. "Técnicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental. 2 ed. Editorial Mac Graw Hill. España. 1998.
- [14] SWAMME, Prabhata and TIAGY, Aditia. "Describing water quality index with aggregate index". Journal of environmental engineering. Pág. 451-455. May 2003.