

INFORME TECNICO

Marzo 2007

Desarrollo de un sistema portátil de análisis de calidad de agua

Germán Comina^b, Alex Rojas^b, Juan Rodríguez^{a,b} y José Solís^{a,b}

^a Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima, Perú

^b Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, P.O. Box 31-139, Lima, Perú

Se ha desarrollado un sistema que puede ser utilizado para monitorear el agua en tiempo real que esta basado en un sistema conocido como "lengua electrónica". Este sistema consiste en la combinación de sensores electroquímicos no selectivos (electrodos de metales nobles), el procesamiento y tratamiento de las señales de los mismos, y un algoritmo de reconocimiento de patrones. El sistema determina atributos antes que parámetros simples.

Para lo cual se ha diseñado un sistema de dos electrodos (platino y oro) para analizar líquidos usando la voltametría cíclica pulsada. Para monitorear la respuesta de los sensores a los estímulos se implementó un sistema de adquisición de datos, un potencióstato y el tratamiento de los mismos basados en una computadora portátil. Debido a que se tendrá una gran cantidad de datos, para el análisis de los mismos se ha desarrollado un programa utilizando el análisis multivariacional el cual reduce el número de datos y permite agrupar datos que tengan algo en común (atributo). Se utilizarán muestras de agua con diferentes concentraciones de contaminantes orgánicos (*E. coli*) y con la ayuda del análisis microbiológico se determinará la contaminación de la muestra, luego con la ayuda de un algoritmo de reconocimiento se comparará el patrón obtenido con los que hay en la base de datos.

El prototipo desarrollado es portátil y ha evaluado la calidad del agua de consumo humano en zonas rurales (Puente Piedra y Yaurisque-Cusco). El sistema ha logrado determinar cualitativamente cambios en la composición

química y bacteriológica de agua. El sistema portátil ha podido reconocer la calidad del agua y ha sido probado para el análisis en línea de sistema de desinfección de agua usando la energía solar en zonas rurales. Los resultados muestran que usando sólo el electrodo de oro es posible la detección de la contaminación con *E.coli*, por ende la supervisión en tiempo real de los niveles de contaminación del agua.

Palabras clave: calidad de agua, "lengua electrónica", análisis multivariado.

1. Introducción

Contar con agua potable segura es un derecho de toda persona, sin embargo, gran parte de la población mundial no tiene acceso. En el Perú se tiene agua de baja calidad en las zonas rurales y en la periferia de las zonas urbanas que no cuentan con redes de agua y desagüe. La contaminación del agua y el limitado acceso al agua potable induce problemas sociales, económicos y de salud. Por ende la incidencia de diarrea infantil y de enfermedades endémicas fatales (hepatitis, fiebre tifoidea o cólera) es muy alta. Si bien es cierto, en zonas urbanas existen adecuados niveles de tratamiento de agua por parte del estado o empresas privadas. En cambio en las zonas rurales los pobladores utilizan agua de ríos, pozos, y otras fuentes, que pueden estar caracterizadas por un elevado grado de contaminación.

Para determinar la calidad de las aguas se determina su característica físico química y biológica. En agua libre de contaminación de elementos pesados, los parámetros bacteriológicos del mismo tienen mayor importancia. Los organismos coliformes son buenos indicadores de la calidad higiénica del agua. Las bacterias Coliformes, comprenden la *estericchia coli* y *Enterobacter aragenes*. Ambos organismos son bacilos cortos, gram, negativo que fermentan la lactosa con producción de gas. El *E. Coli* se encuentra normalmente en el tracto gastrointestinal del hombre y los animales, donde no suele causar enfermedad, y de allí su nombre Coli, que deriva del colon. El hallazgo de un gran número de organismos en el agua indica la polución o contaminación fecal. Ya que las enfermedades transmitidas por el agua generalmente son de carácter intestinal, la presencia de polución indica la

posibilidad de que existan agentes etiológicos productores de estas enfermedades.

Para determinar el número de estas bacterias se suele emplear dos tipos de procedimientos. El procedimiento del número más probable (MPN), y el de filtración a través de una membrana (MF). El método MPN emplea un medio de cultivo líquido en tubos de ensayos a los cuales se añaden la muestra de agua. Mientras que el método más común por filtración (MF), la muestra de agua se pasa a través de un filtro de membrana estéril, que tiene las bacterias y luego el filtro se incuba en un medio de cultivo. Estos procesos normales de microbiología demoran por lo menos 18 h. Usando estas técnicas tradicionales no se puede monitorear el agua en tiempo real y un técnico tiene que hacer la medida, lo cual hace que sea inviable de implementarlo en zonas rurales.

En el presente proyecto se ha desarrollado un prototipo para el análisis del agua para consumo humano en zonas rurales que esta basado en un sistema conocido como "lengua electrónica" que puede discriminar diferentes muestras líquidas. La lengua humana consta de una gran cantidad de células del gusto que están diseminados por la lengua. El líquido o alimento que uno ingiere estimula estas células, estas envían información a través de las neuronas al cerebro donde se compara con patrones almacenados y se reconoce el sabor. Imitando los sistemas biológicos, se han desarrollado lenguas electrónicas que son sistemas que determinan atributos del líquido analizado (ver Figura 1).

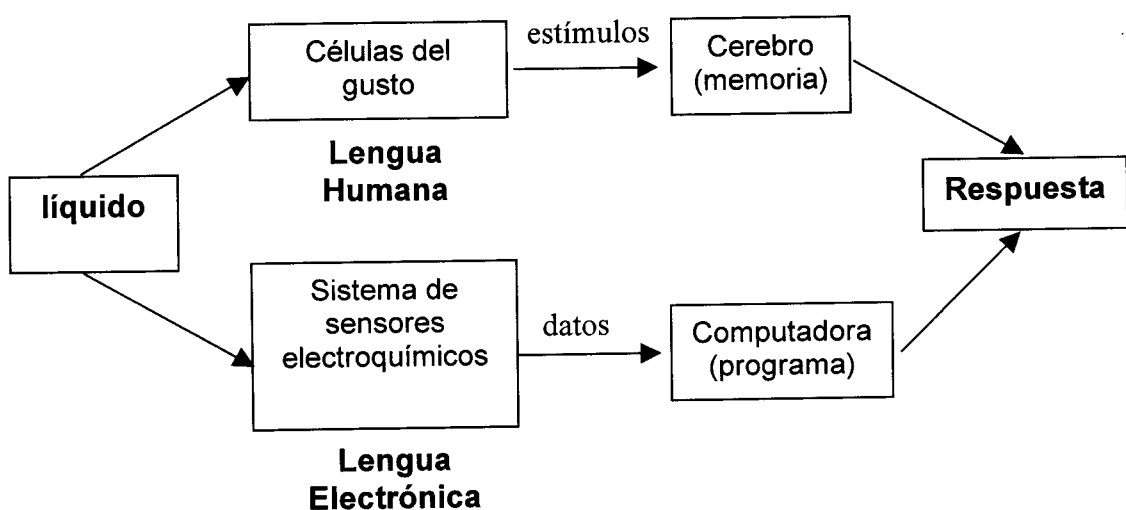


Figura 1. Esquema de una lengua humana y electrónica.

La lengua electrónica se basa en métodos electroquímicos [1, 2]. Este sistema involucra la combinación de sensores no selectivos (electrodos metálicos, oro, iridio, platino, rodio, etc.) y un procesamiento de la señal. En realidad un sensor químico es difícilmente específico para un solo analito, en cambio muestra un solapamiento parcial o amplio para diferentes especies. Respuestas transitorias de corriente son obtenidas como el resultado de la aplicación de pulsos de potencial aplicados a cada electrodo. Patrones de respuesta únicas para muestras líquidas son interpretadas con métodos matemáticos y estadísticos, por ejemplo análisis de componentes principales. El sistema podrá medir cualitativamente cambios en la composición química y bacteriológica en el agua analizada, debido a que las bacterias consumen y producen sustancias químicas cuando están creciendo. Debido a que se tendrá una gran cantidad de datos, para el análisis de los mismos se ha desarrollado un programa en Matlab que utiliza el análisis multivariacional, el cual reduce el número de datos y permite agrupar datos que tengan algo en común (atributo), que esta relacionado con la calidad del agua analizada.

2. Prototipo del sistema de análisis de calidad de agua

El sistema de análisis de la calidad de agua se basa en un sistema denominada "lengua electrónica", el cual se basa en métodos electroquímicos. El sensor electroquímico diseñado se basa en una celda voltamétrica modificada, donde se tiene un arreglo de electrodos de trabajo de diferentes metales (oro y platino), un contra electrodo y un electrodo de referencia. A éste sistema, el cual está en contacto con un líquido, se le aplica una diferencia de potencial, y se mide la corriente que pasa a través de los electrodos. Esta corriente es función de la naturaleza del líquido que se analiza. Utilizando como herramienta el análisis multivariacional, se puede, distinguir sabores, y también detectar y medir la concentración de un cierto material en el líquido que se analiza. En la Figura 2 se observa el diagrama esquemático de la lengua electrónica desarrollada.

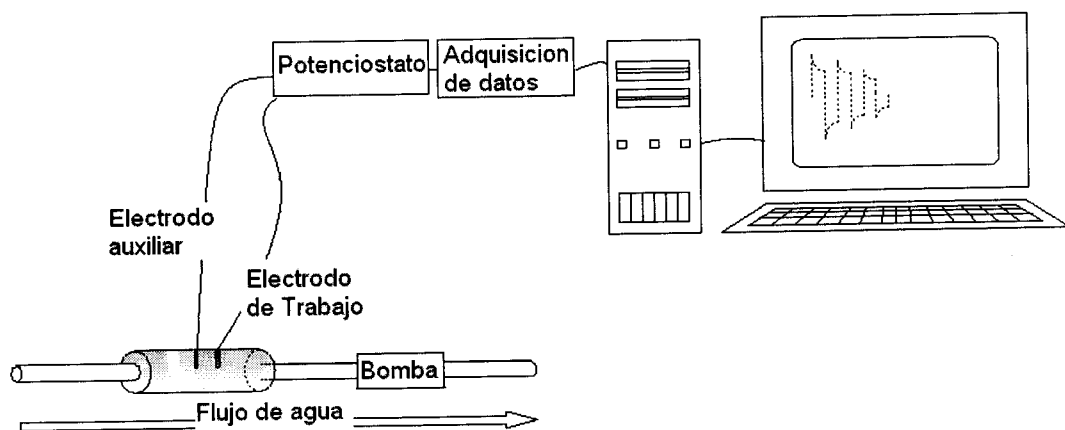


Figura 2. Diagrama esquemático del sistema de calidad de agua desarrollada.

2.1 Celda electroquímica y electrodo diseñado

En estos sensores electroquímicos, la corriente aplicada al electrodo de trabajo se mide en función del voltaje (voltimetría) o para un potencial fijo (amperometría). Las respuestas de corriente son diferentes debido a que diferentes componentes electroactivos y especies cargadas en la solución interaccionan en la vecindad del electrodo. La Figura 3 muestra una celda para medidas voltamétricas, esta configuración de tres electrodos consiste del electrodo de trabajo (WE), un electrodo de referencia (RE) y un electrodo auxiliar (AE). La corriente debido a una reacción electroquímica se mide entre los electrodos auxiliar y de trabajo, el voltaje se aplica entre los electrodos de referencia y de trabajo [3].

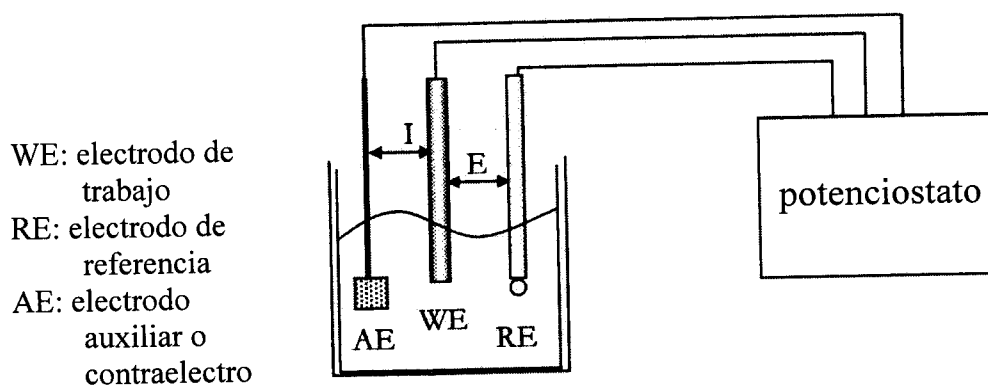


Figura 3. Esquema de una celda para de medidas voltamétricas [3].

En la práctica, dos reacciones ocurren en el electrodo de trabajo. Uno involucra la corriente farádica o redox, que puede ser debido a la transferencia electrónica debido a la oxidación o reducción de las especies electroactivas a través de la interfase electrodo/solución. Este proceso obedece a la ley de Faraday cuando la corriente es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa producida por la cantidad de reacción química. La otra reacción en el electrodo involucra un proceso no farádico. Una carga capacitiva es obtenida cuando las especies polares o cargadas son distribuidas en una doble capa en la superficie del electrodo. Dependiendo de la magnitud del potencial aplicado, especies cargadas de signo opuesto son atraídos al electrodo, mientras que las otras son repelidas. Entonces, las corrientes de carga depende de la magnitud del potencial aplicado, área del electrodo, composición de la solución y la absorción / desorción (ver Fig. 4).

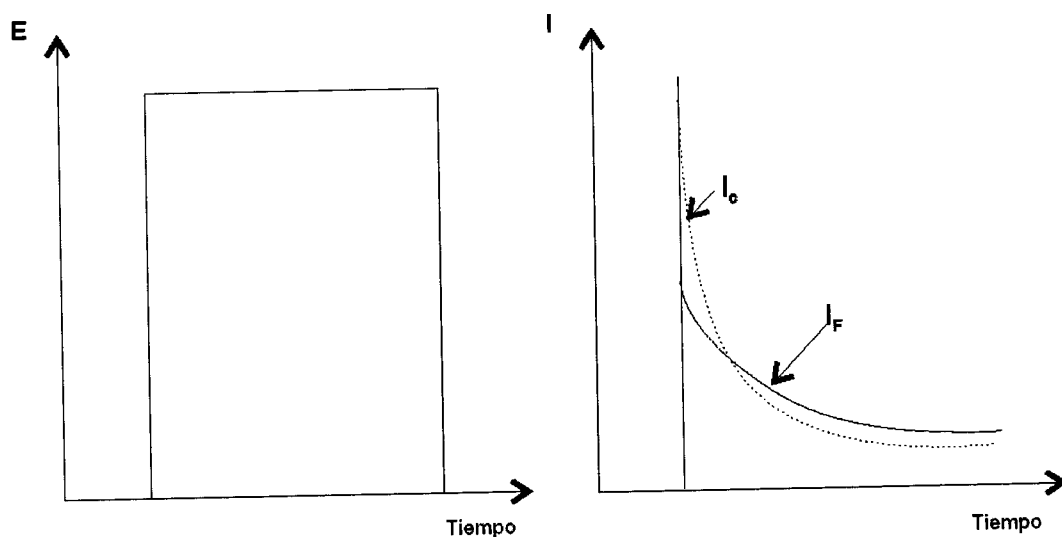


Figura 4. Esquema de la corriente farádica (I_f) y de carga (I_c) en función del tiempo para un electrodo en forma de disco para un potencial escalón.

En nuestro caso se utilizó el sistema de 2 electrodos, en este caso se hizo un puente entre el electrodo de referencia y el electrodo auxiliar. Las especificaciones técnicas de los electrodos utilizados son:

- Electrodo auxiliar: Acero Inoxidable
- Electrodos de trabajo: uno de platino y el otro de oro

Los pares de electrodo de trabajo y auxiliar se han diseñado y desarrollado en el laboratorio. Se fabricó un cabezal sensor, ver Figura 5, dicho cabezal funciona como soporte para los electrodos de una celda electroquímica de dos

electrodos. La base de soporte es de acero inoxidable y funciona como contra-electrodo, los electrodos de trabajo se fabricaron con alambre de oro (Premion®, 1mm de diámetro, con una pureza de 99.985%) y platino (World Precision Instruments Inc, 1mm de diámetro, Item PTP406). El aislante que soporta a los electrodos de trabajo en la estructura del contra-electrodo es acrílico dental (3M ESPE Valux Plus).

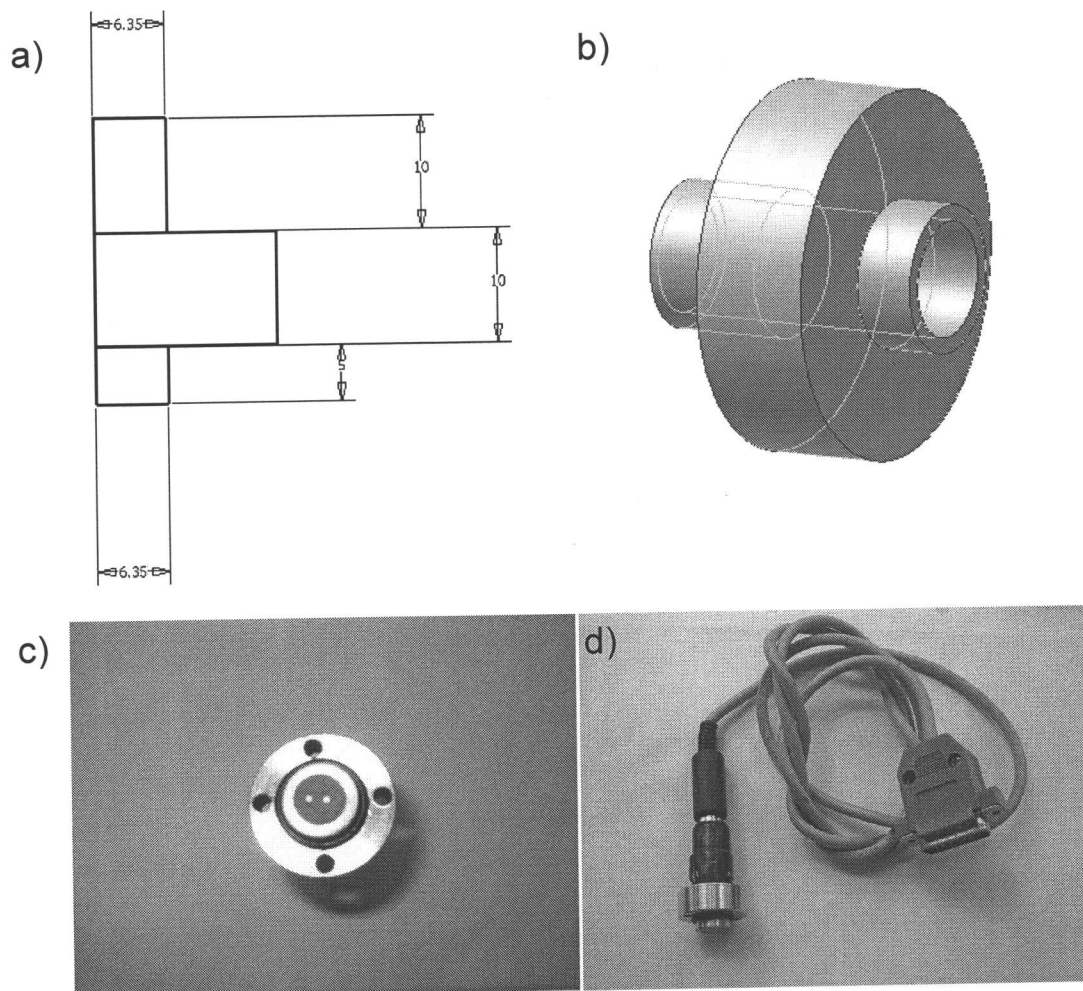


Figura 5. Electrodo diseñado para el sistema, (a) Vista lateral parcial, (b) Vista 3D, (c) Fotografía de la parte superior del cabezal sensor, y (d) Fotografía del cabezal y conexión eléctrica.

Para la toma de muestra en una forma automática e incrementar la reproducibilidad en la toma de muestras, se fabricó un mezclador de líquidos con cinco entradas, durante el proyecto solo se usó una entrada. Se ha diseñado una celda electroquímica donde se colocará el líquido a analizar, se

limpiara y se colocara otra de una forma automática mediante una pequeña bomba. La Figura 6 muestra los cortes de la celda y en la tapa se encuentra los electrodos. El mezclador se fabrico con Teflon®; con las dimensiones que se muestran en la Figura 6b.

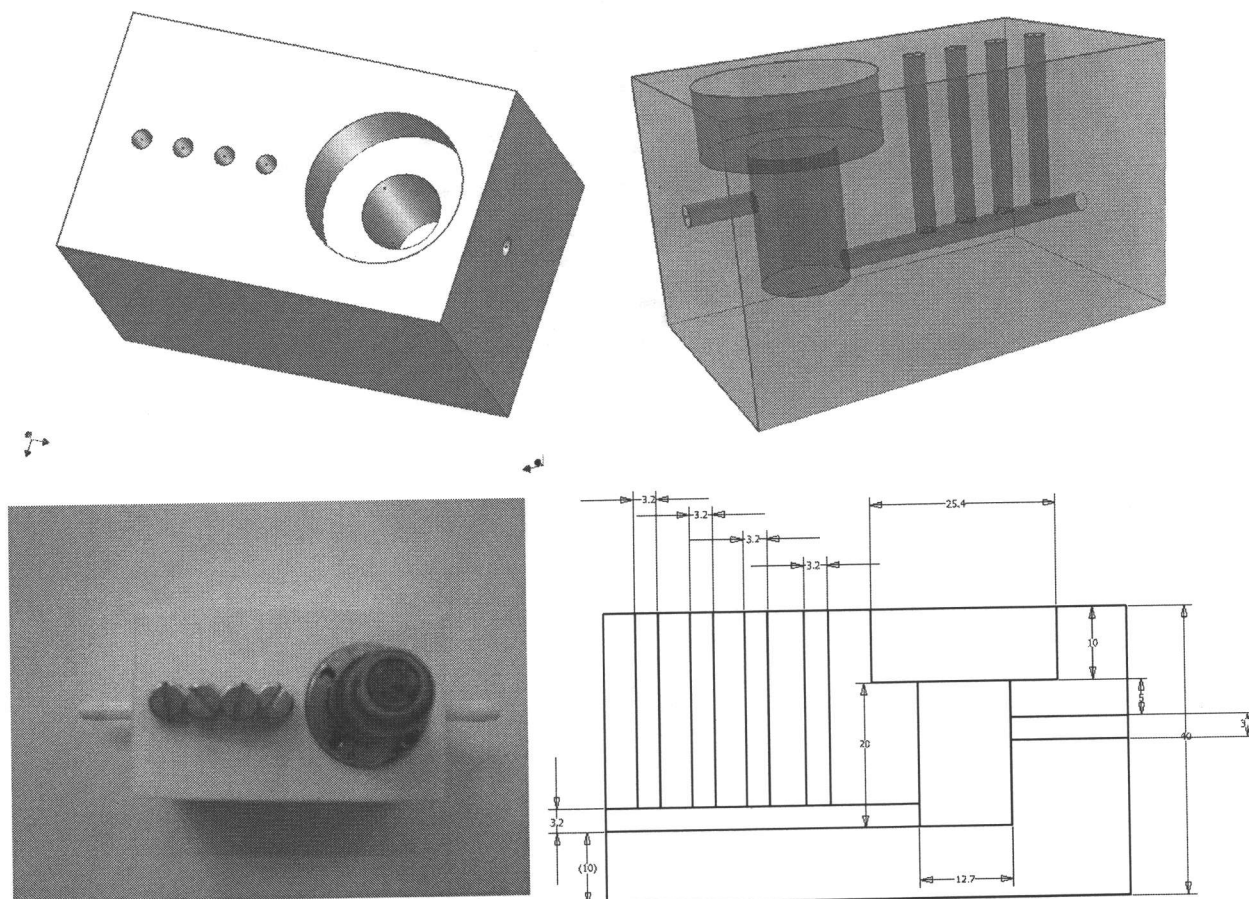


Figura 6. Celda electroquímica diseñada para el prototipo de sistema de medida de calidad de agua.

2.2 Sistema de adquisición de datos

Se ha utilizado un potenciostato portátil Uniscan PG580 con entrada para múltiples electrodos de trabajo, este potenciostato se puede controlar con una computadora por el puerto USB. El software de adquisición se realizó en el LabView®, este software es capaz de adquirir datos del potenciostato y almacenarlos en archivos de texto, además de permitirle al usuario configurar totalmente los parámetros de voltaje, tiempo, frecuencia de toma de datos y diseño factorial y fraccional del experimento. En la Fig. 7 se observa el diagrama de flujo del programa.

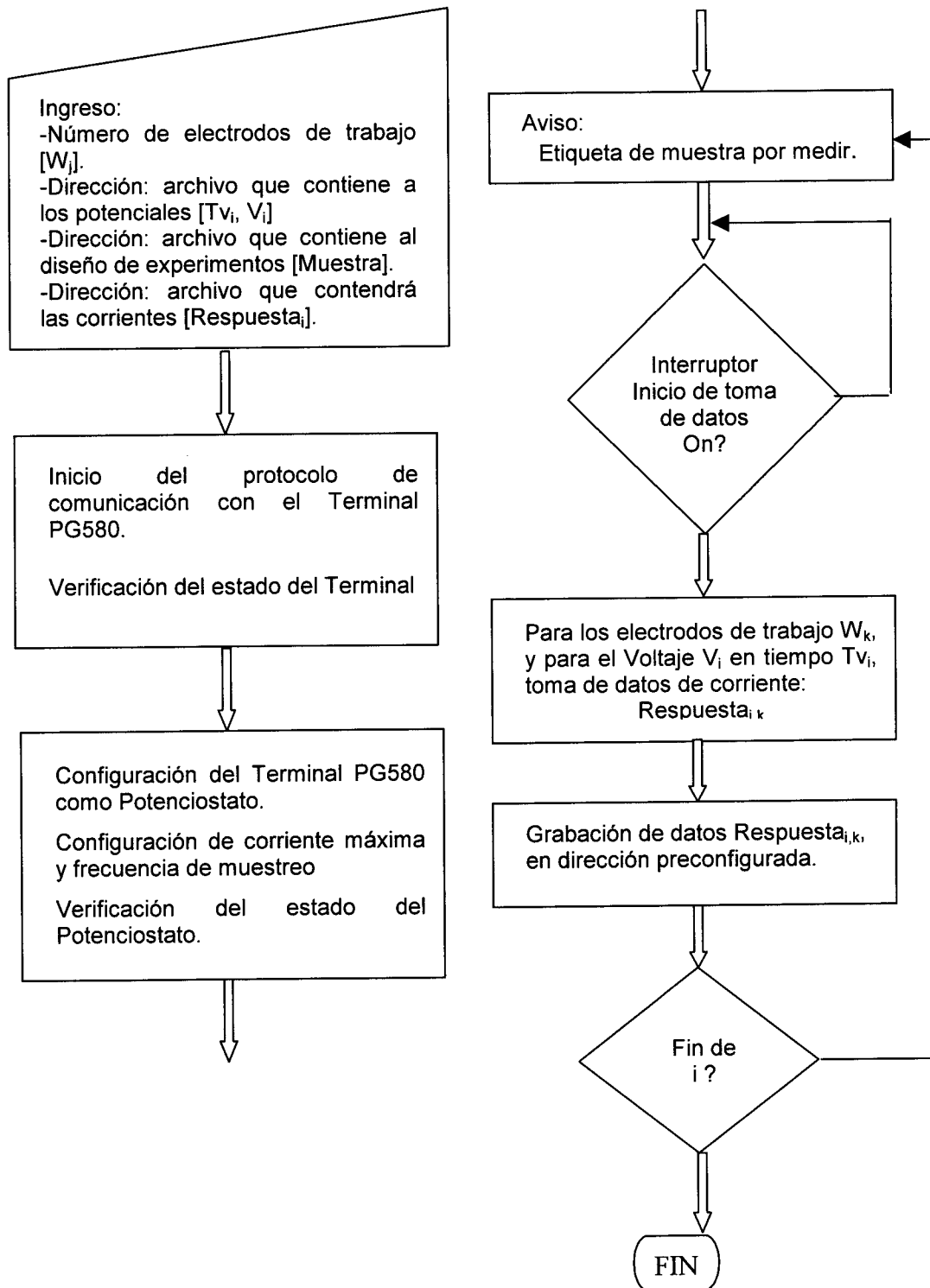


Figura 7. Algoritmo del programa de adquisición de datos del potenciostato PG580.

La Figura 8 muestra la fotografía del prototipo desarrollado y la Figura 9 muestra la pantalla del software de adquisición desarrollado en LabView.

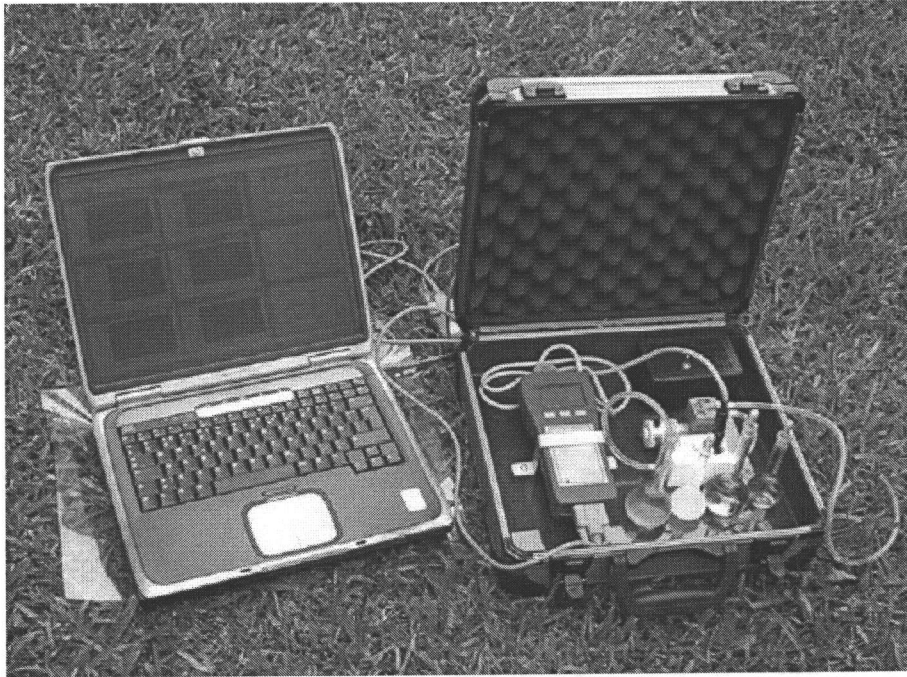


Figura 8. Foto del sistema desarrollado.

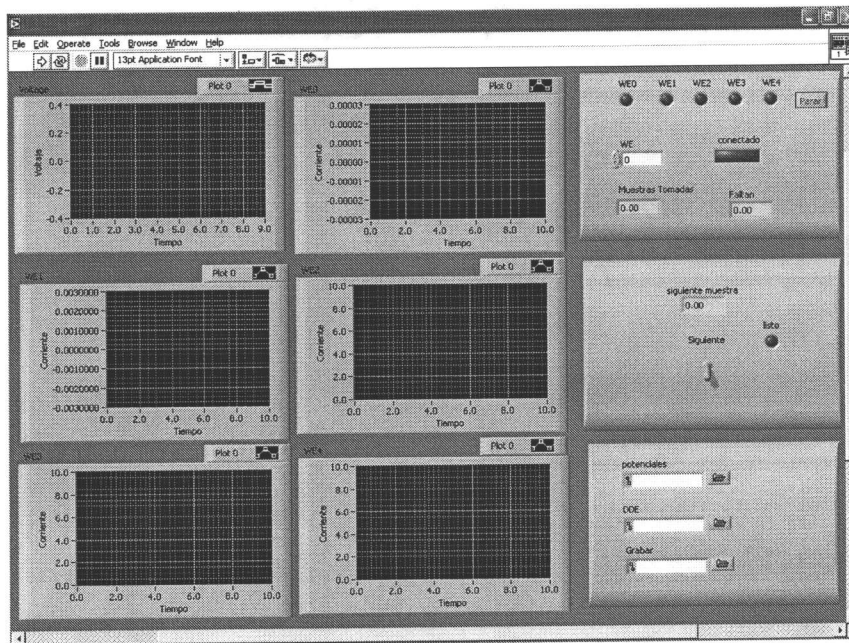


Figura 9. Pantalla principal del software desarrollado en LabView.

2.3 Software de reconocimiento de patrones

El análisis multivariado consiste en observar o determinar ciertas propiedades de un sistema a través de mediciones indirectas de las mismas. Las

aplicaciones del análisis de datos usando métodos multivariados son bastante amplias, como por ejemplo en análisis de olor y sabor en narices y lenguas electrónicas [4-6], en la determinación de variables de control ambiental, como la demanda química de oxígeno (COD) [7], el reconocimiento automático de rostros [8], etc.

Los objetivos del análisis multivariado se pueden dividir en tres grupos [9]:

- Descripción de datos (modelos para la exploración de datos).
- Clasificación y discriminación (PCA).
- Predicción y regresión (PLS, PCR).

El análisis por componentes principales (PCA), es la técnica más utilizada del análisis multivariado [10]. Su objetivo es identificar las fuentes que producen la mayor variancia en un conjunto de datos. Las variancias máximas del conjunto de datos se encuentran distribuidas en las llamadas componentes principales.

La medición de j parámetros o "variables" de i muestras u "objetos", pueden representarse por la matriz: X_{ij} . Por tanto cada medición de una muestra, se expresa como un vector en el espacio j -dimensional. El PCA permite reducir las dimensiones de dicho espacio.

Usando el PCA los datos del espacio j -dimensional, por lo general, se proyectan en el plano formado por la componente principal 1 (PC1, es la dirección en el espacio j -dimensional, donde está la mayor variancia de X) y la componente principal 2 (PC2, es la segunda dirección en importancia donde esta la variancia de X); pero también es posible proyectar los puntos sobre el espacio formado por las primeras tres componentes principales.

El PCA usa el algoritmo NIPALS (Non-linear Iterative Projections by Alternating Least-Squares), inventado por Herman Wold en 1966. El primer paso es centrar cada objeto de la matriz respecto de la media \bar{x}_j como se observa en la ecuación:

$$x_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_j \quad (1)$$

Luego se crea un modelo lineal, el cual consta por un término llamado de estructura, formado por el producto de dos matrices (TP^T), y el término de error residual, E , o la parte de la matriz que no pudo ajustarse al término de estructura, como se observa en la ecuación:

$$X = TP^T + E \quad (2)$$

O en forma equivalente:

$$X = \sum_{w=1}^A t_w p_w^T + E \quad (3)$$

donde A , es el número de componentes principales del modelo, t_w es el vector de "score" para la componente w y p_w es el vector de "loading" para la componente w . El algoritmo NIPALS calcula sucesivamente cada t_w , p_w y cada E_w que es la matriz de error para cada componente principal w . Los gráficos que se utilizan en el presente trabajo son los gráficos de "score" con dos componentes principales PC1 y PC2.

El Software de reconocimiento de patrones basado en el análisis multivariado se ha desarrollado usando funciones especiales en Matlab®. La Figura 10 muestra el algoritmo.

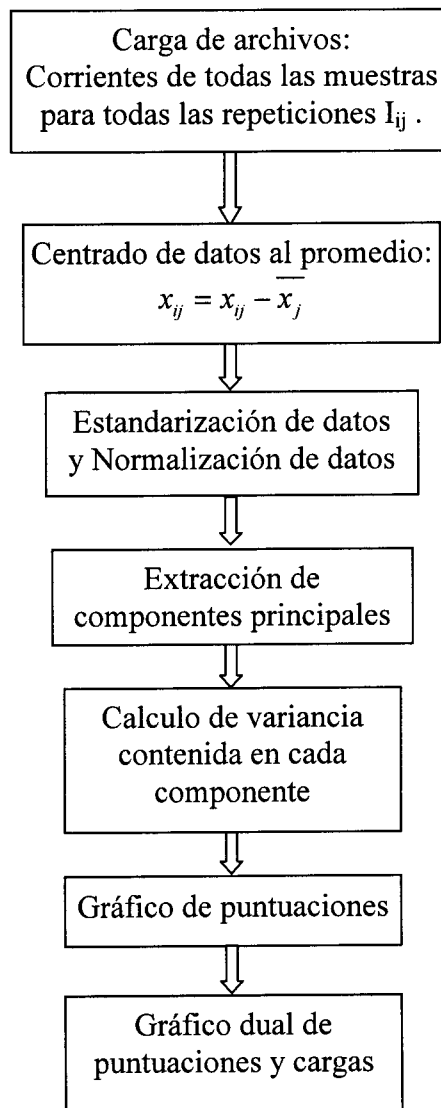


Figura 10. Algoritmo del programa de análisis multivariado desarrollado.

El software desarrollado en Matlab® que utiliza las herramientas estadísticas del mismo, realiza el análisis de componentes principales. Se han desarrollado funciones que son totalmente integrables al programa principal hecho en Labview.

3. Análisis de jugos

La lengua electrónica tiene que ser entrenada para una cierta aplicación, al igual que los sentidos del ser humano. Por ejemplo, el ser humano compara el sabor de una naranja que esta comiendo con sabores de otras naranjas que comió en el pasado. Es decir compara el patrón de la naranja con los patrones almacenados correspondientes a naranjas comidas en el pasado. Este entrenamiento también se puede realizar utilizando herramientas matemáticas de patrones de reconocimiento.

Se analizaron jugos envasados de piña, naranja, manzana, pera, durazno y una muestra de agua sin gas. Las muestras se colocaron en envases etiquetados con números, luego en forma aleatoria se midieron tres veces cada muestra. Para realizar las medidas de corriente se puso una señal de voltaje escalonada entre los electrodos de trabajo y contra electrodo, tal como se observa en la Fig. 11, y se midió la corriente en función del tiempo en cada uno de ellos.

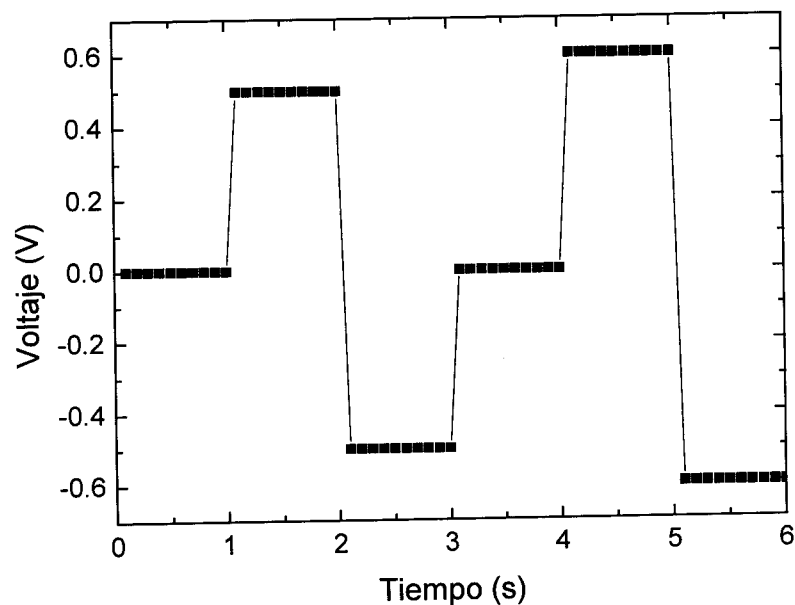


Figura 11. Voltaje de entrada a los electrodos y el contra electrodo.

La corriente en función del tiempo, para cada electrodo de trabajo se observa en la Figura 12. Para todas las muestras analizadas.

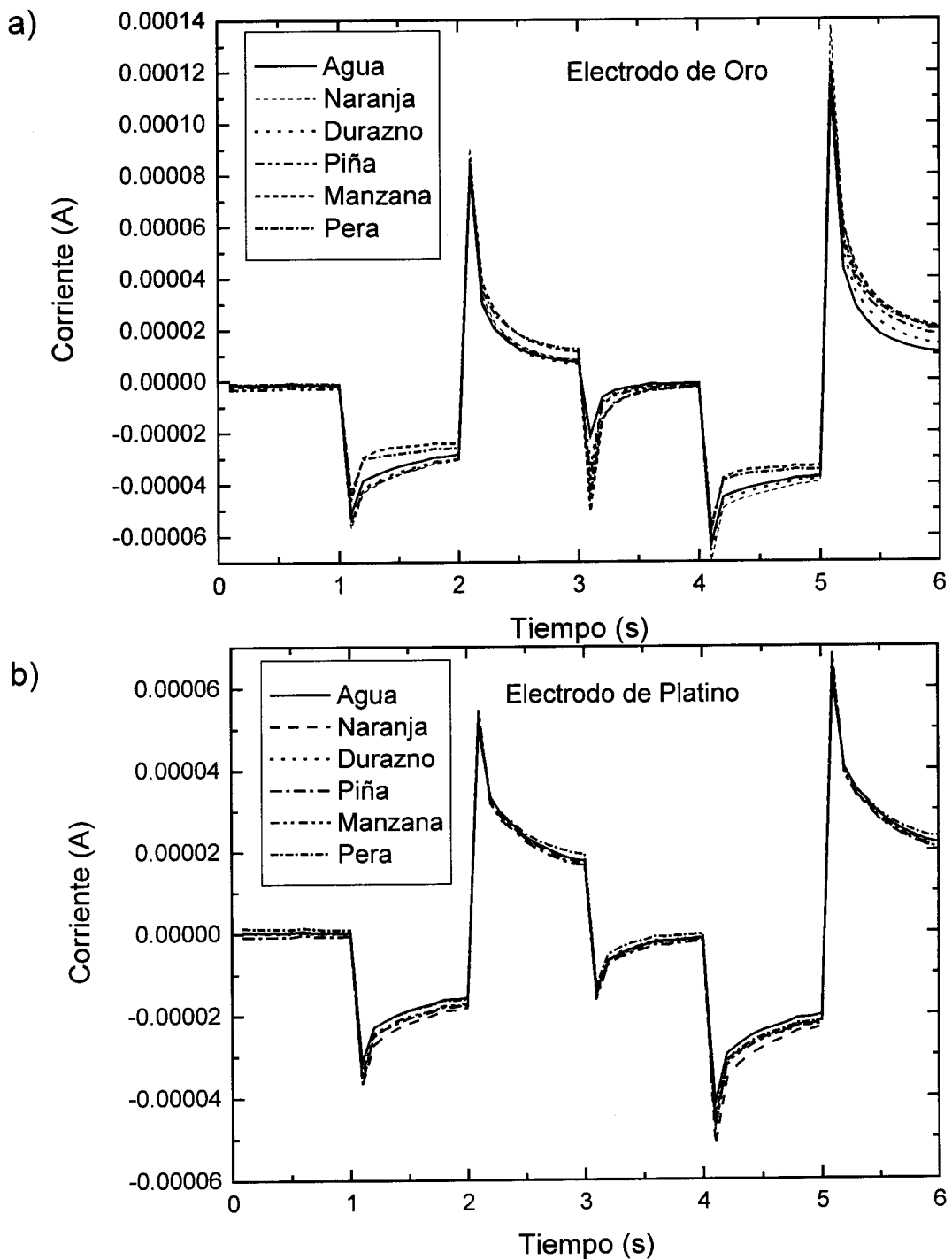


Figura 12. La corriente en función del tiempo para el electrodo de trabajo de (a) oro y (b) platino para muestras de agua y jugo de naranja, durazno, piña, manzana y pera.

Se tiene que cada electrodo tiene una respuesta diferente para cada muestra. Con la matriz formada con todos los datos obtenidos, se hizo un análisis de

componentes principales y se obtuvo clusters para cada muestra analizada. Para ello se utilizaron las funciones hechas en Matlab® para obtener el gráfico de componentes principales que se muestra en la Figura 13.

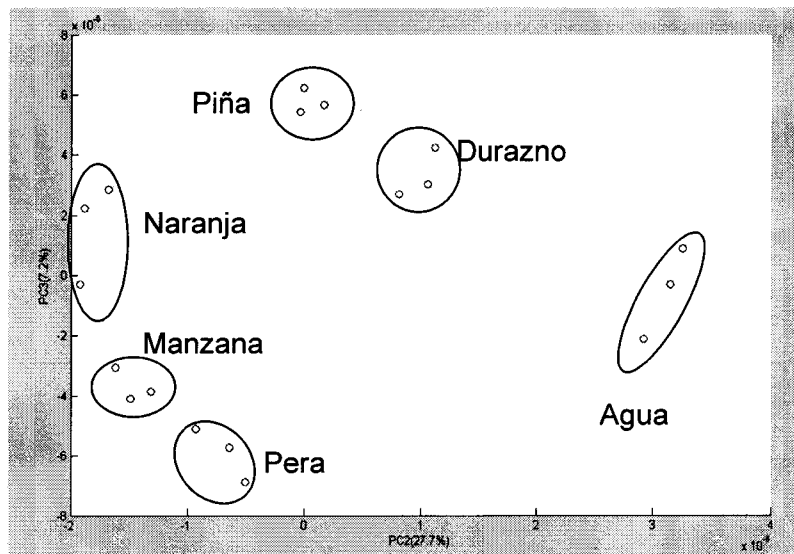


Figura 13. Gráfico PCA de las muestras de agua, jugo de naranja, durazno, piña, manzana y pera.

Como se puede observar en el presente caso, se pudo obtener una diferenciación entre clusters, por tanto se puede concluir que el prototipo desarrollado puede diferenciar el “sabor” de los diferentes jugos.

4. Análisis de agua

Nuestro objetivo es determinar la calidad de agua usando el sistema desarrollado, para lo cual la Blg. Jackeline Venero Tapia ha encontrado lugares de Lima donde se usa agua para consumo humano sin tratamiento y se ha realizado los análisis respectivos. Esta agua será usada para optimizar nuestro prototipo. Los resultados de los análisis microbiológicos fueron realizados en la Laboratorio “Marino Tabusso” de la Universidad Nacional Agraria La Molina de dichas fuentes de agua (Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20th Ed., 1998). Para la prueba de nuestro sistema desarrollado, se selecciono una fuente de agua contaminada en Lima para las pruebas de laboratorio, y luego se ubico una zona rural donde probar nuestro sistema.

4.1 Muestra de agua contaminada para experimentos de laboratorio

Se seleccionaron dos tipos de fuentes de abastecimiento de pozos de agua y manantes o puquíos de lugares de consumo humano en Lima que presentan contaminación. Se analizaron varios pozos de agua, de los cuales 2 pozos corresponden al distrito del Callao, y 1 al distrito de Carabayllo. El agua de Pozo 01 y Pozo 02, corresponde al de la Av. Néstor Gambeta, Ventanilla, Callao. Mientras que el agua de Pozo 03 es de Trapiche, Distrito de Carabayllo, Lima

Tabla 1. Resultados del análisis microbiológico de muestras de agua de pozos.

Análisis Microbiológico (APHA AWWA WEF – 1998)	Pozo 01	Pozo 02	Pozo 03
Recuento de heterótrofos (UFC/ml)	30 x 10 ²	70 x 10	30 x 10
Enumeración de coliformes totales (NMP/100ml)	33	17	4
Enumeración de coliformes fecales (NMP/100ml)	<1.8	<1.8	<1.8
Enumeración de E.coli (NMP/100ml)	<1.8	<1.8	<1.8

Los resultados obtenidos en el análisis microbiológico (Tabla 1) del agua de los Pozos estudiados nos indican que estas tienen una presencia de bacterias heterótrofas (bacterias diversas presentes en el ambiente) en una cantidad regular. Respecto a la presencia de coliformes totales se encuentra que hay una pequeña cantidad. En cuanto a la presencia de coliformes fecales y E.coli nos indica que hay ausencia de dichas bacterias.

Posteriormente se eligieron tres puquios o manantes del Distrito de Puente Piedra. Estos puquios o manantes son fuentes de agua de abastecimiento y consumo directo. El puquio Choqué se encuentra en la zona Industrial, el puquio Tamboinga se encuentra ubicado en la zona de San Remo, y el puquio Saucos se encuentra en la zona de gallinazos, todos estos en el distrito de Puente Piedra. Los tres puquios están expuestos totalmente al ambiente, sin ningún tipo de protección, los pobladores acceden a estas fuentes de agua de manera directa para abastecerse, incluso entrando con zapatos a dichas fuentes, en algunos casos se observó que bañan a sus mascotas, lavan su ropa, etc. En ninguno de estos puquios se observa que se protejan los ojos de agua. Cabe señalar que en esta zona la napa freática es muy próxima a la

superficie, cabe señalar que el puquio choqué se encuentran próximo a un canal de desagüe.

Tabla 2. Resultados del análisis microbiológico de muestras de agua de puquio.

Análisis Microbiológico (APHA AWWA WEF – 1998)	01 Puquio Choque	02 Puquio Tamboinga	03 Puquio Sauces
Recuento de heterótrofos (UFC/ml)	75 x 10	28 x 10 ³	52 x 10 ²
Enumeración de coliformes totales (NMP/100ml)	92 x 10	24 x 10 ³	49 x 10 ²
Enumeración de coliformes fecales (NMP/100ml)	49 x 10	24 x 10 ³	49 x 10 ²
Enumeración de <i>E.coli</i> (NMP/100ml)	24 x 10	21	20 x 10

Los resultados obtenidos del análisis microbiológico (Tabla 2) demuestran que estas muestras se encuentran contaminadas. La presencia de heterótrofos, y la presencia de coliformes totales es alta, siendo la mas contaminada con estos microorganismos, la muestra del puquio tamboinga. En estas muestras se ha encontrado la presencia de coliformes fecales en cantidades considerablemente altas en cuanto a la presencia de *E. coli* se encontró en las tres muestras, siendo la muestra mas contaminada con *E.coli* la muestra tomada en el puquio Choqué.



Figura 14. Fotografía del puquio Choque.

Para las pruebas de laboratorio se selecciono el agua proveniente del puquio Choque debido a que tiene una gran cantidad de *E. Coli*. En la Figura 14 se observa la toma de muestra del puquio Choqué.

4.2 Conteo de colonias por el método de filtración de membrana de muestras de agua

Para el uso del agua contaminada con el sistema desarrollado, esta se debe de caracterizar microbiológicamente, para lo cual se ha utilizado el método de filtración de membrana. Este método se puede utilizar en zonas rurales con un equipo portátil denominado DelAgua de Oxfam. Se rotulan 2 frasquitos que contienen 9.9 mL de agua destilada estéril para realizar las diluciones. Luego se coge 100 mL del agua contaminada con la ayuda de una micropipeta y se añade al primer frasquito y se mezclan suavemente, esto corresponde a una dilución 10^{-2} . Posteriormente se vuelve a coger 100 mL esta dilución y se agrega al segundo frasquito de agua destilada estéril y se mezclan suavemente, esto corresponde a una dilución 10^{-4} . Esta dilución se filtra con una membrana, luego esta membrana se coloca sobre las placas pad al que se ha añadido 1.75 mL de Lauril sulfato. Después de colocar la membrana con la muestra en la placa se deja unos minutos al ambiente y luego se lleva a la incubadora a 37 °C por un espacio de 19 - 20 h, al cabo del cual se realiza el conteo o lectura de las unidades formadoras de colonia por 10 mL (UFC/10mL). Expresando el número de colonias por la dilución a la que se ha trabajado.

La esterilización del equipo de filtración se realiza por la incineración con alcohol metílico, y para desinfectar superficies y otros se usa alcohol etílico.

Si el número de UFC/10 mL exceden a 800 se considera incontable como lo indica el método. En todo el trabajo se tiene especial cuidado con la limpieza e higiene del material y el ambiente de trabajo.

4.3 Preparación de las muestras de agua contaminada artificial.

Para las pruebas de laboratorio también se contamina agua potable con *E. Coli*. Para esto se sembró *E. coli* (ATCC10536) 24 h antes del experimento en placas Petri. La siembra se realizó tomando un inóculo con el Asa de Coll, luego se

dispersó el cultivo sobre toda la placa sin dejar espacios vacíos, las placas sembradas se dejaron en la incubadora por un espacio de 18 h. Se colectó 5 L de agua potable un día antes de cada prueba, para disminuir el nivel de cloro residual en el agua.

Al día siguiente se retiró de la incubadora la placa que contiene el cultivo y se dejó a temperatura ambiente por 10 min, luego se tomó un alícuota de 3 mL del agua colectada y se mezcló suavemente con el cultivo, con la ayuda de una Asa de Coll para preparar un concentrado de bacterias. Se cogió 100 μ L de este concentrado y se mezcló con 160 mL adicionales de agua, esta mezcla se agregó al balde que contiene los 5 L de agua.

En todo momento se trabajó al lado de un mechero Bunsen para crear un ambiente estéril en el área de trabajo.

4.4 Muestra de agua de una zona rural, Yaurisque, Cusco

El equipo fue probado en una zona rural. Este trabajo experimental de campo se realizó en el distrito de Yaurisque a unos 48 km de la ciudad de Cusco, exactamente está ubicado a una Latitud de 13° 39' 37.24"S, y Longitud 71° 55' 6.59" O. El lugar está ubicado a una Altitud de 3330 msnm en la cual el agua de consumo humano no tiene ningún tipo de tratamiento.

Sobre el río Yaurisque desembocan los desagües de la posta médica y del colegio del lugar, el trabajo se ha llevado a cabo en colaboración con el Centro de Capacitación de Desarrollo, CECADE, de Cusco (ver Fig. 15).

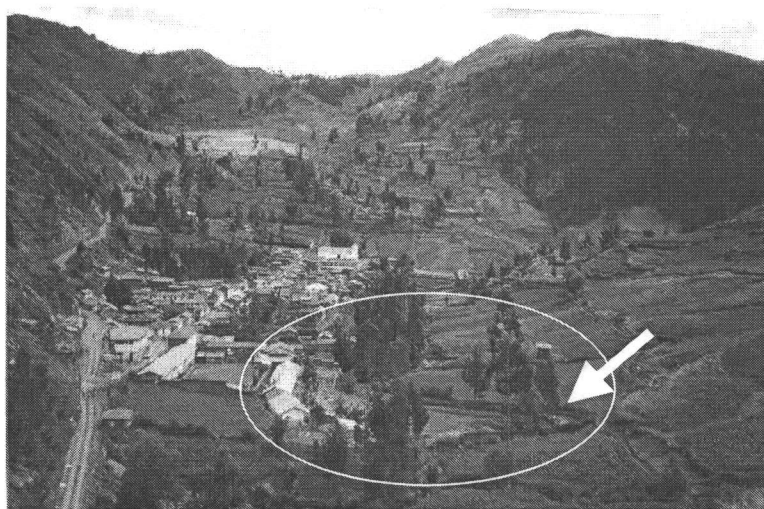


Figura 15. Fotografía de Yaurisque.

5. Resultados de la medida de calidad de agua

Se realizaron las pruebas de voltametría cíclica a muestras de agua limpia y contaminada artificialmente para determinar el rango de voltaje en el cual tienen diferente respuesta. El agua contaminada artificialmente tiene un número de UFC/10 mL que exceden a 800, por ende se considera incontable como lo indica el método, se usó esta agua para ver si se puede diferenciar con un agua limpia. Se eligió un rango de trabajo entre 0.8V y -0.8V para evitar la descomposición del agua y una velocidad de barrido de 20 mV/s, los voltagramas obtenidos (ver Fig. 16) nos muestran una marcada diferencia (un corrimiento en valores de corriente) entre -0.1V y -0.4V, se midieron después de 2 h 30 min y 3 h 30 min después de preparada la muestra artificial. Se puede observar las medidas son reproducibles.

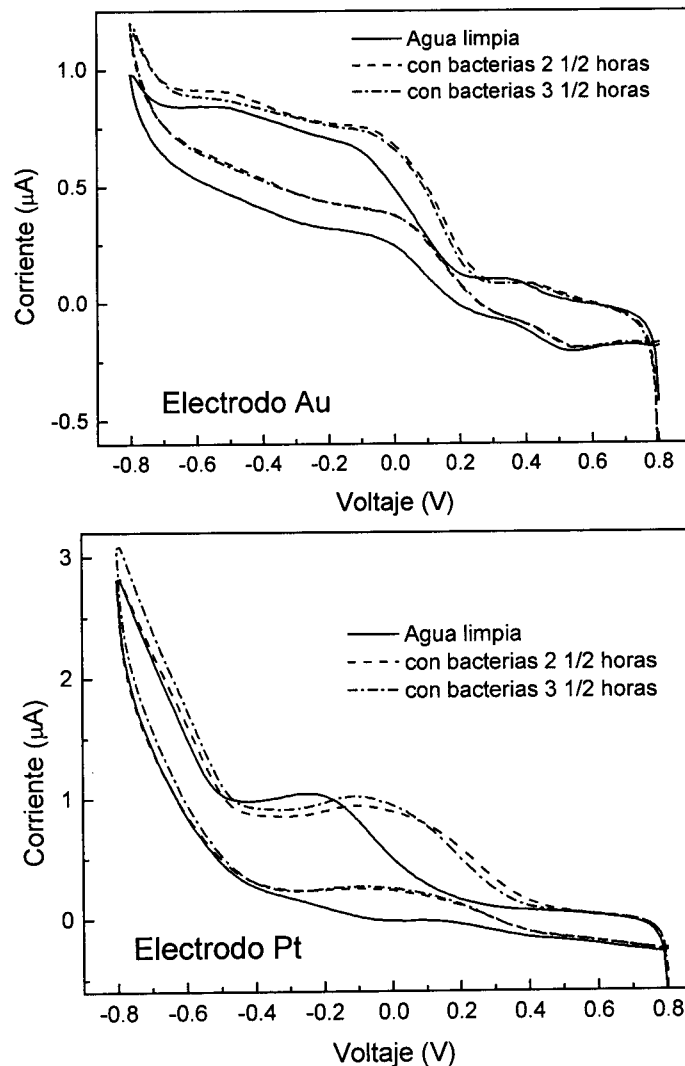


Figura 16. Voltametría cíclica de agua limpia y agua contaminada artificialmente para ambos electrodos.

A partir de la voltametría cíclica se eligió un potencial escalón como se muestra en la Fig. 17 para el análisis de muestra de agua.

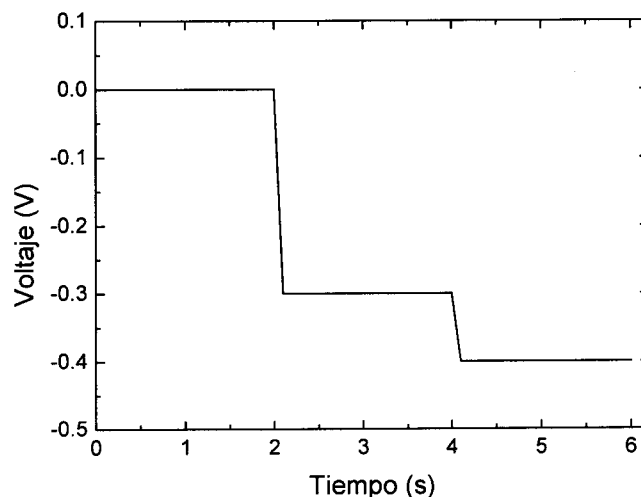


Figura 17. El voltaje en función del tiempo utilizado para el análisis de muestra de agua.

En este rango ocurre se puede observar la diferencia entre el agua limpia y el agua con bacterias, los voltajes establecidos fueron de -0.3V y de -0.4V por un tiempo de 2 s. Para tener muestras con diferente concentración de bacterias se preparó muestras de agua contaminada con diferente concentración de e.coli, según la sección 4.3. Se prepararon tres muestras con diferentes concentraciones de E.coli, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Concentraciones de las muestras hechas en laboratorio.

Muestra	M3	M2	M1
Concentración de E.coli	Alta	Media	Baja
UFC/ E.coli	Incontables x 10^{-1}	Incontables x 10^{-2}	554×10^{-4}

Se midió cada una de las tres las muestras en orden aleatorio tres veces. Usando el potencial que se observa en la Figura 17. Todas las mediciones se realizaron a 25°C, 67% de HR. En la Figura 18a se observa las corrientes de respuesta de los electrodos de Au y Pt a las diferentes muestras de agua contaminada artificialmente, solamente con el electrodo de Au se puede diferenciar claramente las muestras. Para una mejor visualización se obtuvo la grafica de componentes principales para del electrodo de Au (ver Fig. 18b).

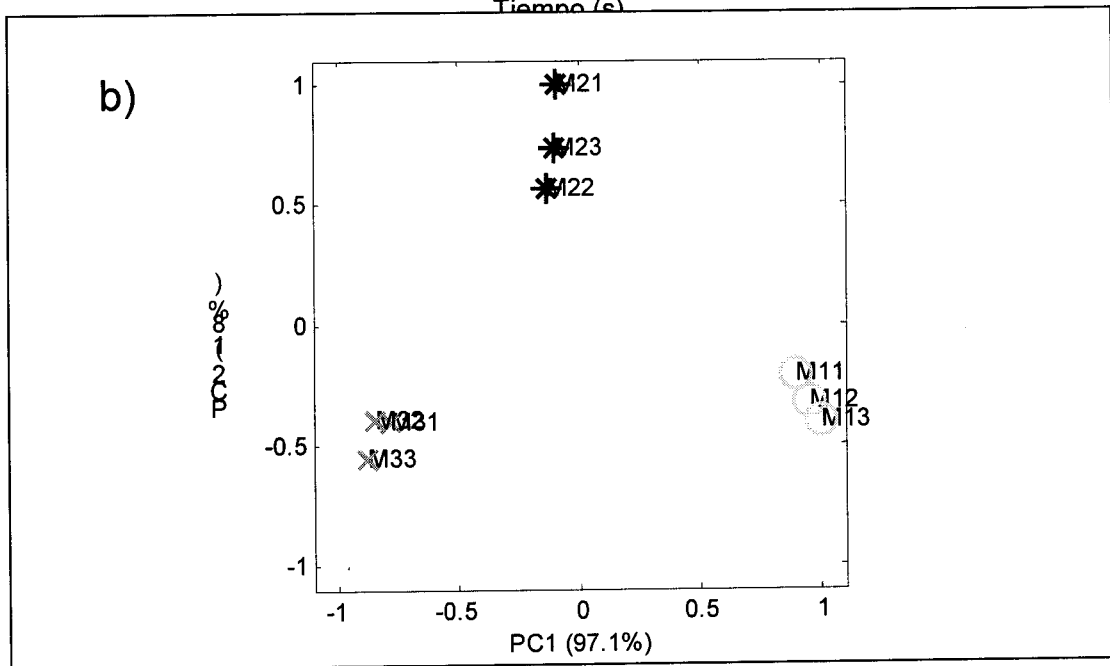
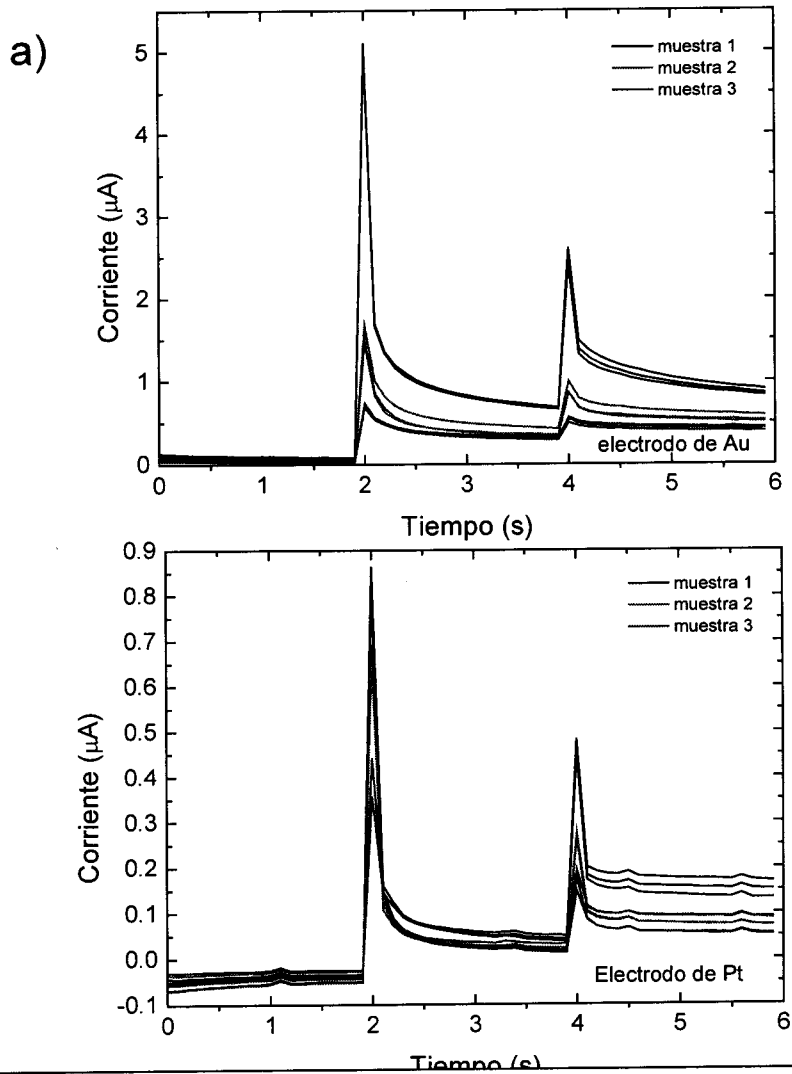


Figura 18. a) La respuesta de corriente en función del tiempo para las muestras de agua contaminada para los electrodos de Au y Pt, y b) Grafica de componentes principales para el electrodo de Au.

Una forma económica de desinfectar agua es por medio del uso de la radiación solar, esta técnica se conoce como descontaminación de agua en unidades independientes (DSAUI) [11-13]. Esta técnica consiste en la irradiación solar de agua contaminada contenida en botellas de plástico (recipientes de bebidas comerciales), obteniéndose al final del proceso agua apta para consumo humano, como se observa en la Figura 19b.

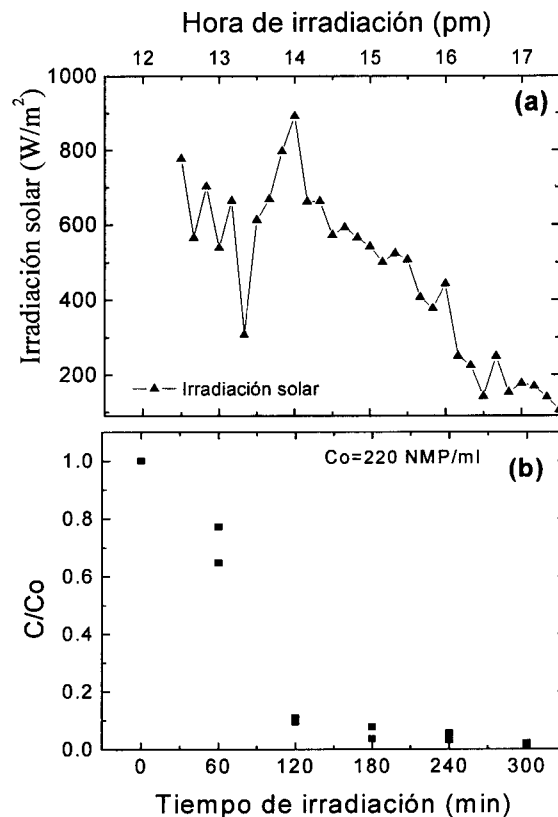


Figura 19. (a) Irradiación solar y (b) Concentración de coliformes normalizada durante la desinfección del agua.

Para evaluar nuestro sistema desarrollado, empleamos agua del puquio de Choque, de Puente Piedra; esta muestra de agua se encuentra contaminada con *E. coli*, y con bacterias del género *Pseudomonas sp.*, dicha contaminación es natural. La muestra fue sometida a un proceso de fotólisis, exponiendo 3 muestras de agua del puquio en botellas PET de 500 mL a radiación solar durante 4 h (10 a.m a 2 p.m) (ver Fig. 20). Se monitoreo el proceso de fotólisis cada hora, los resultados obtenidos con el sistema desarrollado se muestra en la Fig. 21. Se puede observar que se pueden discriminar fácilmente, el sistema puede monitorear el proceso muy bien. La muestra inicial tenía 42×10^{-1} *E.coli* y al cabo de 4 h de irradiación solar no tiene *E. coli*.



Figura 20. Fotografía de las muestra de agua expuestas al sol.

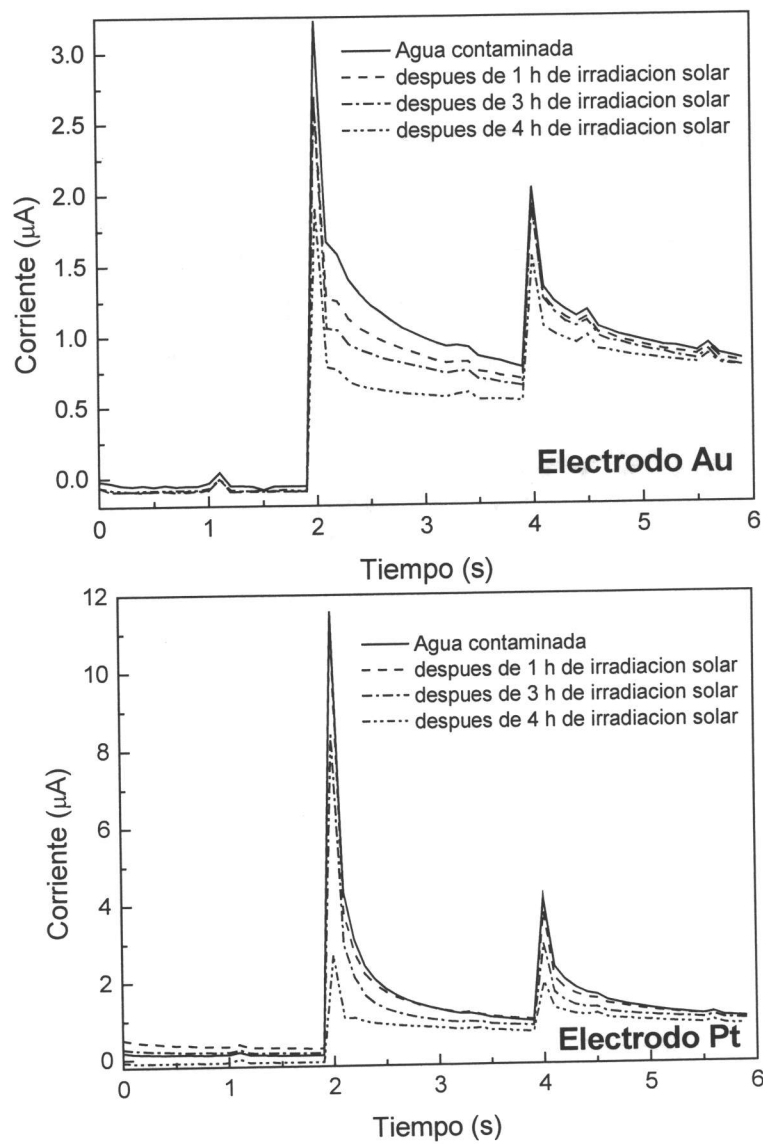


Figura 21. La respuesta de corriente en función del tiempo para las muestras de agua contaminada para los electrodos de Au y Pt, sometidas diferentes tiempos de irradiación solar.

Se repitió el experimento anterior y solo se midió la muestra inicial y luego de 4 h de irradiación solar. Se puede observar (ver. Fig. 22) que se puede distinguir claramente la muestra contaminada y la muestra limpia. Es importante que la matriz del agua utilizada sea la misma para poder comparar.

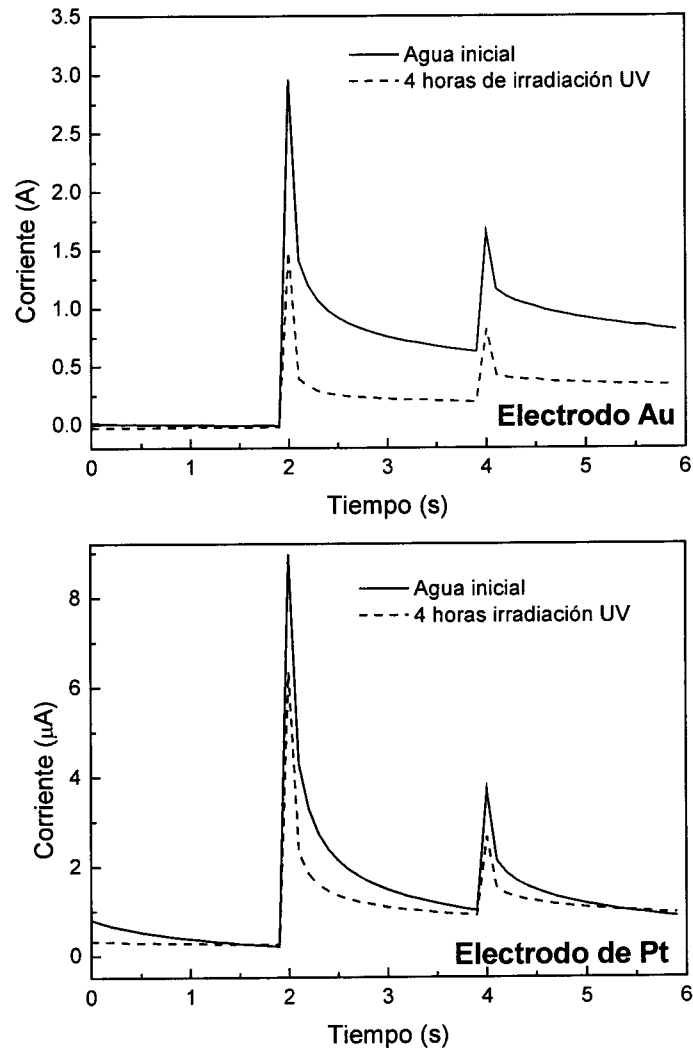


Figura 22. La respuesta de corriente en función del tiempo para las muestras de agua contaminada y limpia para los electrodos de Au y Pt, sometida a 4 h de irradiación solar.

Una vez que el sistema ha sido optimizado con pruebas de laboratorio se procedió a realizar medidas en una zona rural donde se tiene que el río está contaminado. Se realizaron medidas en Yaurisque, el sistema puede operar con batería, se irradiaron muestras de agua del río en botellas PET para descontaminarlas y se monitoreó con el sistema desarrollado. En la Fig. 23 se observa una fotografía del sistema en la zona de medida.



Figura 23. Fotografía del sistema en Yaurisque con las botellas en posición expuestas a la radiación solar.

Las muestras colectadas del río Yaurisque fueron analizadas microbiológicamente y muestra una gran contaminación de *E.coli* (ver Tabla 4). Estas disminuyen después de ser irradiadas con luz solar y después de 4 h presentan aun una pequeña cantidad de e.coli.

Tabla 4. Analisis microbiologico de las muestras de agua del rio Yaurisque.

Tiempo	Fotólisis Muestra 1 UFC/10 ml
Control inicial	117 x 10 <i>E.coli</i> 190 x 10 <i>Pseudomonas sp.</i>
T₁ 1 hora	60 x10 <i>E. coli</i> 71 x 10 <i>Pseudomonas sp.</i>
T₂ 2 horas	19 x 10 <i>E.coli</i>
T₃ 3 horas	4 x 10 <i>E. coli</i> 4x 10 <i>Pseudomonas</i>
T₄ 4 horas	2 x10 <i>E. coli</i>

En la Figura 24 se muestra la respuesta típica de las muestras de agua del rio inicialmente y después de ser irradiada con luz solar por 1h, 2h, 3 h, y 4h. Se

puede distinguir las muestras pero no fácilmente. Para lo cual se realizó el análisis de componentes principales, el cual ayuda a observar las diferencias que tienen las muestras de agua de río (ver Fig. 25).

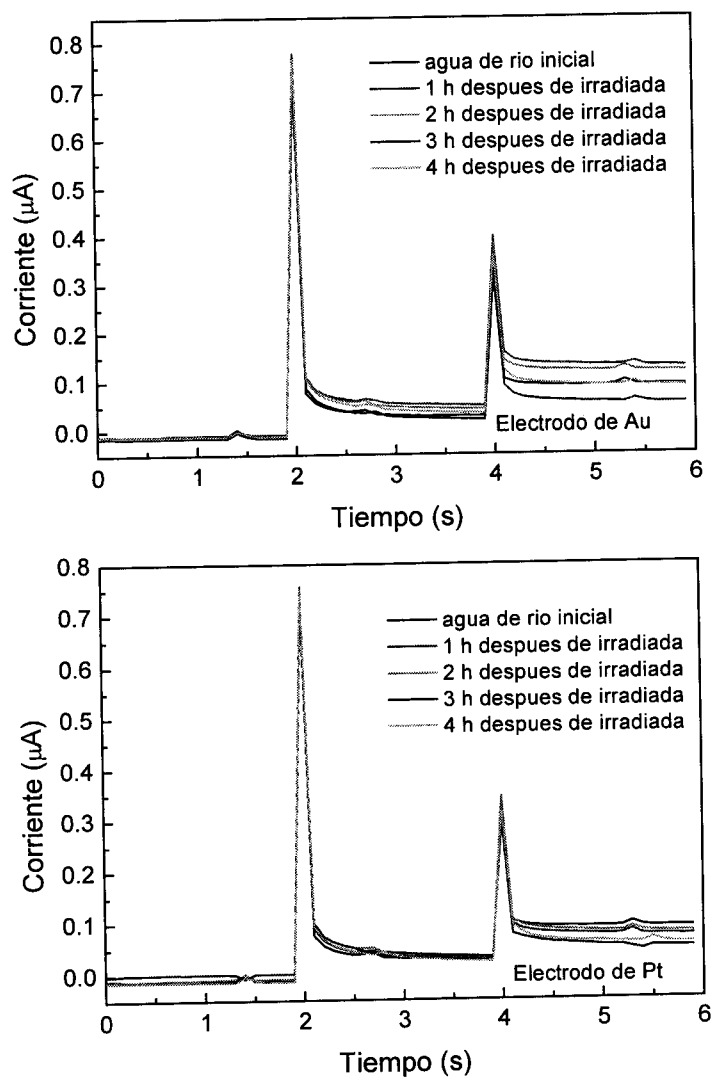


Figura 24. La respuesta de corriente en función del tiempo para las muestras de agua del río Yaurisque y después de ser irradiada con luz solar por 1h, 2h, 3h y 4h, para los electrodos de Au y Pt.

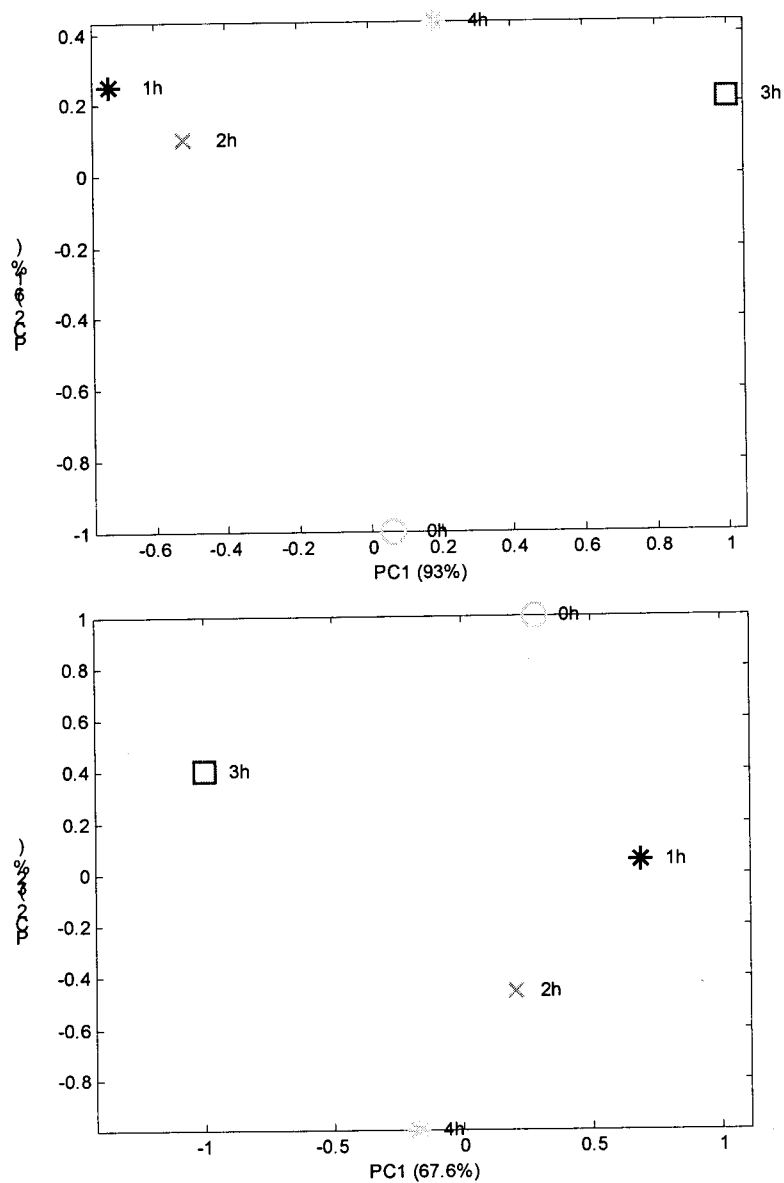


Figura 25. Grafica de componentes principales para el electrodo de Au y Pt de muestra de agua del río Yaurisque.

6. Conclusiones

- El prototipo desarrollado ha logrado discriminar diferentes de agua contaminada con *E.coli*.
- Se ha encontrado que las muestras de agua necesitan analizarse desde el punto de la voltametría cíclica para optimizar el potencial escalon adecuado.

- El prototipo desarrollado puede usarse en zonas rurales, puesto que con una pequeña batería se puede alimentar todo el sistema, una medida toma de dos a tres minutos, así que el consumo eléctrico no es mucho y se puede realizar una gran cantidad de medidas.
- El potencióstato portátil es la componente que mas cuesta del equipo, así que esa parte esta siendo reemplazado por un diseño de un potencióstato basado en una tarjeta de adquisición usando el USB.

BIBLIOGRAFÍA

1. F. Winqvist, P. Wide, and I. Lundstrom, "An electronic tongue based on voltammetry", *Analytica Chimica Acta*, **357** (1997) 21-31.
2. F. Winqvist, C. Krantz-Rülcker, P. Wide, and I. Lundstrom, "Monitoring of freshness of milk by an electronic tongue on basis of voltammetry", *Measurement Science and Technology*, **9** (1998) 1937-1946.
3. A.J. Bard, y L.R. Faulkner, "Electrochemical Methods : Fundamentals and Applications", (2000) 2nd ed., Wiley Text Books, EEUU.
4. H. Abe, T.Y. Yoshimura, S. Kanaya, Y. Takahashi, Y. Miyashita, and S. Sasaki, "Automated odor-sensing system based on plural semiconductor gas sensors and computerized pattern recognition techniques", *Analytica Chimica Acta*, **194** (1987) 1-9.
5. J.W. Gardner, "detection of vapours and odours from a multisensor array using pattern recognition. Part 1: Principal components and cluster analyses", *Sensors and Actuators B*, **4** (1991) 108-116.
6. S. Holmin, Liquid sensing: Development and characterization of an electronic tongue based on electrochemical methods, (2002), Tesis doctoral, Universidad de Linköping University, Suecia.
7. G. Comina, S. Holmin, P. Ivarsson, F. Winqvist, C. Krantz-Rülcker, "COD monitoring of waste water using an electronic tongue", 2nd SENSPOL Workshop Response To New Pollution Challenges, King's College, London, UK. 4-7 June (2002).
8. V. Perlibakas, "Distance Measures for PCA-based face recognition", *Pattern Recognition Letters*, Vol.25 Issue 6 pp.711-724 (2004)
9. K. Esbensen, "Multivariate Data Analysis in Practice". CAMO Process AS, (2001).
10. Karl S. Booksh, "Encyclopedia of Analytical Chemistry", R.A. Meyers (Ed.), John Wiley & Sons Ltd, pp. 8145-8169, Chichester, (2000).
11. Acra, Z. Raffoul y Y. Karahagopian, *Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solutions*, UNICEF, S.A.L, Beirut, Lebanon, 1984.
12. S. Arafa y M.C. Cotis, *Solar disinfection for rural communities*, Taller en Brace Research Institute, 15-27 de Agosto, Quebec, Canadá, 1988.
13. Sommer, *Solar water disinfection: impact on vibrio cholerae and faecal coliforms*, Taller CINARA, Universidad del Valle, Cali, Colombia y EAWAG/SANDEC, Duebendorf, Switzerland, 1995.