



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUIMICA**

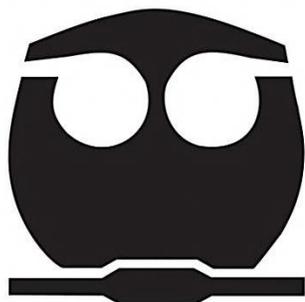
**Mapas dinámicos de  $[H^+]$  en un modelo físico  
con inyección lateral**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA:**

**ANDREA MIRANDA MARTÍNEZ**



**MEXICO, D.F.**

**2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente: Prof. ALBERTO INGALLS CRUZ

Vocal: Prof. JOSÉ ANTONIO BARRERA GODÍNEZ

Secretario: Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES

1er Suplente: Prof. BENJAMÍN BELTRAN FRAGOSO

2do Suplente: Prof. LAMBERTO DIAZ DAMACILLO

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Facultad de Química, U.N.A.M., Edificio D, Laboratorio 005

Asesor del tema:

---

Dr. José Bernardo Hernández Morales

Sustentante:

---

Andrea Miranda Martínez

## Contenido

Resumen.....	7
1 Introducción .....	8
1.1 Marco de trabajo .....	8
1.2 Justificación .....	11
1.3 Hipótesis .....	11
1.4 Objetivo.....	12
1.5 Metas .....	12
2 Antecedentes.....	13
2.1 Mezclado.....	13
2.2 Modelado físico.....	14
2.3 Modelado matemático.....	15
2.4 Tiempo de mezclado.....	16
2.5 Patrón de flujo del fluido.....	16
2.6 Patrón de flujo del trazador.....	18
3 Procedimiento experimental .....	20
3.1 Dispositivo experimental .....	20
3.2 Patrón de calibración .....	22
3.3 Evolución del campo de color y del pH local.....	23
4 Resultados.....	24
4.1 Patrón de calibración .....	24
4.2 Respuesta del sistema con un trazador distinto.....	27
4.3 Evolución del campo de color .....	27
4.4 Respuesta local del sistema (pH vs. tiempo) .....	29
5 Análisis de resultados y discusión .....	30
5.1 Determinación de los valores de <i>RGB</i> a partir de una imagen .....	30
5.2 Determinación de los valores de <i>RGB</i> para las imágenes patrón.....	33
5.3 Validación de la relación <i>RGB</i> -pH.....	41

5.4	Mapas de evolución de pH y de $[H^+]$ .....	45
6	Conclusiones .....	50
7	Recomendaciones y trabajo a futuro .....	51
8	Referencias bibliográficas.....	52
Apéndice A	.....	55

## Índice de figuras

Figura 1.1. Esquema del convertidor <i>Peirce-Smith</i> [5].	10
Figura 2.1. Ejemplos de propelas para agitación mecánica (modificada de [8]).	13
Figura 2.2. Vectores de velocidad (calculados con un modelo matemático) superpuestos a una imagen de un modelo físico de un molde de colada continua [22].	17
Figura 2.3. Trayectoria del trazador debido a la oscilación de la aleta [23].	18
Figura 2.4. Campo de velocidad, medido mediante <i>PIV</i> , de la aleta oscilante para tres valores de $\theta$ [23].	19
Figura 3.1.-Representación esquemática del dispositivo experimental: (a) lámpara de luz blanca, (b) lanza de acero, (c) jeringa para inyectar al trazador, (d) electrodo, (e) modelo de acrílico, (f) pluma de aire inyectado y (g) cámara de video. Las variables altura del baño y profundidad de la lanza se muestran como "H" y "P" (con una relación de 4:3 con respecto a la altura total del agua), respectivamente. La flecha en color rojo indica la dirección del flujo de aire. ...	21
Figura 4.1. Curva patrón de color y pH, resultante de la adición incremental de diversos volúmenes de trazador (60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 2:1). El volumen total adicionado del trazador se muestra en el eje de las ordenadas.	25
Figura 4.2. Curva de color y pH, resultante de la adición incremental de diversos volúmenes de trazador (60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 1:1). El volumen total adicionado del trazador se muestra en el eje de las ordenadas.	27
Figura 4.3. Secuencia de imágenes resultante de la adición de 1 mL de trazador, con inyección de aire de 3 LPM; los valores debajo de cada imagen son el tiempo (en segundos), referido al instante del inicio de la videograbación.	28
Figura 4.4. pH local como función del tiempo, resultante de la adición de 1 mL de trazador, con un flujo de aire de 3 LPM. La línea punteada vertical indica el instante en el que se adicionó el trazador.	29
Figura 5.1. Impresión de pantalla para mostrar el uso del comando <i>PixelValue</i> .	31
Figura 5.2.- Ventana de trabajo de <i>Mathematica 9.0</i> , mostrando el sistema de referencia y una posición y área de muestreo del tamaño de un pixel.	32
Figura 5.3.- Esquema del tratamiento de los resultados.	33
Figura 5.4. Zona de muestreo para la lectura del valor de <i>RGB</i> de cada imagen de la curva patrón.	34

Figura 5.5. Imágenes de la curva patrón (con el valor de pH correspondiente) e imágenes producidas mediante <i>Microsoft PowerPoint</i> para los valores de <i>RGB</i> indicados. ....	36
Figura 5.6. Imágenes obtenidas con dos trazadores distintos: columna 1: trazador 60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 1:1, columna 2: trazador 60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 2:1. a) 0.1 mL, b) 0.2 mL, c) 0.5 mL, d) 0.55 mL y e) 0.6 mL, de volumen de trazador adicionado incrementalmente.....	38
Figura 5.7. Valores de pH para diversos volúmenes de trazador adicionados: 1) trazador 60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 1:1 (curva naranja) y 2) trazador 60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 2:1 (curva azul). ....	39
Figura 5.8. Respuesta local del sistema e imagen a los 32 s de iniciada la videograbación. El tiempo local de mezclado fue de 22 s.....	42
Figura 5.9. Evolución de <i>R</i> , <i>G</i> , <i>B</i> y del promedio de los valores de <i>R</i> , <i>G</i> y <i>B</i> en una zona debajo del electrodo (referirse a la Figura 5.4). ....	43
Figura 5.10. Respuesta local del sistema (pH vs. tiempo) medida (línea amarilla) y estimada usando las curvas de evolución de <i>R</i> (línea roja), <i>G</i> (línea verde), <i>B</i> (línea azul) promedio de los valores <i>R</i> , <i>G</i> y <i>B</i> (línea morada).....	44
Figura 5.11. Malla para las imágenes extraídas del video. ....	45
Figura 5.12.- Mapa de la evolución del pH: (a) 12, (b) 13, (c) 14, (d) 16 y (e) 18 segundos. ....	48
Figura 13. Mapa de concentración de $[H^+]$ para la imagen a 12 segundos; la escala de contornos es logarítmica. ....	49

## Índice de tablas

Tabla 3-1. Volúmen de trazador adicionado. ....	23
Tabla 4-1. Relación de imágenes de patrones con pH. ....	26
Tabla 5-1. Resultados de <i>RGB</i> y pH de las imágenes de la curva patrón. ....	35
Tabla 5-2.- Imágenes obtenidas con los dos trazadores. Se muestra también el valor de pH correspondiente. ....	40

### Listado de símbolos

Símbolo	Significado	Unidades
<i>RGB</i>	<i>Red, Green y Blue</i>	
<i>t</i>	Tiempo	<i>s</i>
$\rho$	Densidad	$kg\ m^{-3}$
LPM	Flujo volumétrico de aire insuflado	LPM

## Resumen

Los fenómenos fluidinámicos dentro de reactores metalúrgicos promueven la evolución de las reacciones químicas de interés y la homogeneización del fluido. Una herramienta comúnmente utilizada para estudiar estos fenómenos es el modelado físico; aunque éste ha sido utilizado exitosamente, no se cuenta con una técnica simple que permita cuantificar la evolución de la distribución del campo de concentración del colorante.

Mediante videograbaciones de un modelo físico que consiste de un tanque rectangular lleno de agua y agitado mediante aireación con una tobera horizontal, al cual se le agrega un trazador (disolución acuosa de colorante y ácido sulfúrico), permitieron extraer imágenes que muestran la evolución del campo de color. Por otro lado, se preparó y fotografió una serie de disoluciones de concentración conocida del trazador a las cuales se les midió el pH para construir una curva de calibración: color (*RGB*) como función del pH. Las imágenes del modelo físico y del patrón de calibración se procesaron con *Mathematica 9.0* y *dev-PASCAL* para generar mapas de acidez para diversos instantes durante el proceso de mezcla. Los mapas de contorno muestran que la novedosa técnica desarrollada en este trabajo funciona correctamente, con lo que es posible realizar mediciones que son confiables y, al mismo tiempo, relativamente sencillas de realizar en modelos físicos desarrollados para estudiar el mezclado en procesos industriales.

## **1 Introducción**

Este capítulo contiene el marco de trabajo en el cuál se inscribe esta investigación. También se presentan: el objetivo, la hipótesis y la justificación de la misma.

### **1.1 Marco de trabajo**

Los procesos de obtención de materiales metálicos y de manufactura de los componentes ingenieriles derivados de éstos, han acompañado a la humanidad desde tiempos inmemoriales. Sin embargo, sólo ha sido hasta tiempos relativamente recientes que se ha dejado de lado la metodología de ensayo y error, en favor del uso de un conjunto de herramientas que permite incorporar conocimiento básico para diseñar, controlar y optimizar estos procesos. A esta metodología se le conoce como Ingeniería de Procesos Metalúrgicos; se basa en estudios de los fundamentos de los procesos utilizando cinco herramientas [1,2]:

- Mediciones en planta
- Mediciones en planta piloto
- Modelos físicos
- Modelos matemáticos
- Mediciones en el laboratorio

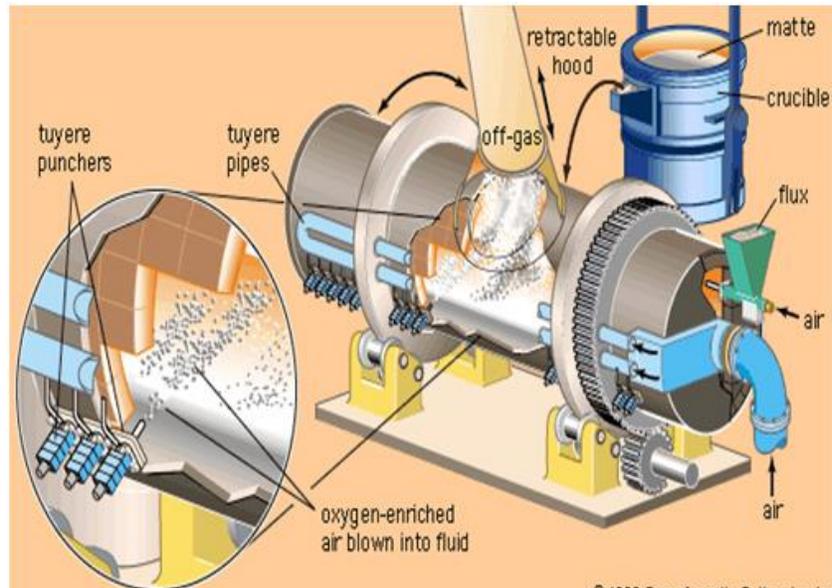
En particular, el modelado físico de procesos de obtención de materiales o de procesos de manufactura de componentes ingenieriles, consiste en realizar observaciones y mediciones de la respuesta de un modelo (usualmente a escala) de un reactor industrial cuando se le somete a un estímulo. En contraste con las otras herramientas, un modelo físico tiene la característica de estar construido con materiales distintos a los del sistema real, así como de funcionar

bajo condiciones diferentes (pero equivalentes) a aquellas bajo las que opera el reactor; debido a esto, es más fácil realizar tanto observaciones como mediciones en este tipo de modelos. En cuanto a nomenclatura, al sistema real se le denomina “prototipo”, mientras que a su representación en el laboratorio se le conoce como “modelo”.

Dependiendo del objetivo buscado, un modelo físico puede ser: 1) riguroso, 2) aproximado o 3) *ad hoc*. El diseño de un modelo físico riguroso o aproximado se basa en criterios de similitud [3, 4], que proveen de la información necesaria para definir los valores de todas las variables de diseño utilizadas en el modelo. A su vez, estos criterios se construyen considerando a los fenómenos que ocurren en el sistema. Los criterios de similitud deben definirse de tal manera que se asegure la correspondencia, entre el modelo y el prototipo, del comportamiento de los campos relevantes para el proceso de interés. Este comportamiento se caracteriza tanto por los valores de los campos como por los valores de los números adimensionales significativos para el proceso a modelar.

El presente trabajo se circunscribe en un proyecto de mayor alcance dirigido a estudiar el proceso de conversión de mata de cobre en un reactor *Peirce-Smith* [5]. Éste, es un reactor cilíndrico horizontal, con toberas ubicadas a los costados (ver Figura 1.1), en el que se lleva a cabo la transformación de la mata líquida (concentrado de mineral compuesto de Cu-Fe-S fundido) a cobre blíster (99% Cu) mediante la inyección de aire enriquecido con oxígeno. Las principales reacciones químicas son la desulfuración del baño líquido y la oxidación del hierro. Dentro del baño líquido existen tres fases inmiscibles: 1) el cobre líquido que se encuentra en la base del reactor por ser más denso, 2) una mezcla de sulfuros en la parte superior del baño líquido y 3) una capa de escoria formada por los óxidos de hierro y los complejos de silicio en la parte superior. Como producto de las reacciones químicas, el azufre presente se oxida para formar dióxido de azufre en forma gaseosa que se libera por la parte superior del

reactor. Este tipo de procesos operan a altas temperaturas por lo que resulta difícil realizar mediciones directamente en el sistema real.



**Figura 1.1.** Esquema del convertidor *Peirce-Smith* [5].

Claramente, la operación del proceso involucra transporte de energía y transporte de masa convectivos, es decir, en presencia de un campo de velocidad (producido por el gas inyectado a través de las toberas). A pesar de que el proceso tiene más de 100 años usándose, aún hay varios aspectos que no se han optimizado. La investigación propuesta, que se ha venido trabajando [6,7], busca desarrollar una metodología novedosa que coadyuve a analizar la dinámica del baño líquido, en particular, el comportamiento de los trazadores que se utilizan comúnmente para estudiar cantidades críticas, tales como el tiempo de mezclado, en modelos físicos. Se espera que su impacto en el campo del modelado físico de procesos sea significativo.

Dado que el foco de interés en este trabajo es probar la metodología propuesta, se utilizó un modelo físico *ad hoc* que solo comparte con un convertidor *Peirce-*

*Smith* el hecho de que se utiliza inyección lateral mediante una tobera sumergida.

## **1.2 Justificación**

La ingeniería de procesos involucra el estudio de fenómenos que demandan herramientas y métodos adecuados para caracterizar los aspectos de interés desde un punto de vista fundamental. La modelación física es una herramienta confiable para adquirir información de un sistema cuando el modelo se diseña siguiendo criterios de similitud relevantes para el prototipo. Si bien hay un gran número de estudios de tiempo de mezclado en modelos físicos, hay poca información con respecto a técnicas diseñadas para caracterizar experimentalmente a la evolución de la distribución del trazador durante los experimentos correspondientes. Por eso es que en este trabajo se desarrolló una metodología para construir mapas de  $[H^+]$ , basada en análisis de imágenes de la evolución la distribución de un trazador colorido y ácido. De esta forma se evita recurrir a mediciones colorimétricas basadas en muestreo o a técnicas costosas basadas en fotografía de alta velocidad, si bien ninguna de éstas se descarta como complemento a la técnica propuesta.

## **1.3 Hipótesis**

Es posible construir mapas dinámicos de concentración de  $[H^+]$  en el interior de un modelo físico (al que se ha adicionado un trazador colorido y ácido) mediante procesamiento de imágenes, para obtener información cuantitativa de la evolución de la distribución del trazador.

## 1.4 Objetivo

Cuantificar la evolución de la distribución de  $[H^+]$  generada por la adición de un trazador (disolución acuosa ácida, colorida) a un modelo físico de un reactor agitado con inyección lateral, mediante análisis de imágenes.

## 1.5 Metas

- i. Generar una curva de calibración pH-color (expresado como *RGB*, *Red Green Blue*).
- ii. Medir la evolución del pH local en un modelo físico con inyección lateral.
- iii. Videgrabar el avance del campo de color asociado con la distribución del trazador en el modelo.
- iv. Obtener, mediante análisis de imágenes, los valores del campo de color (escala *RGB*) y asociarlos al campo de pH para realizar gráficos de contorno que representan cuantitativamente mapas de acidez que cambian con el tiempo.
- v. Determinar el tiempo local y el tiempo global de mezclado.

## 2 Antecedentes

### 2.1 Mezclado

El mezclado es una operación ampliamente utilizada en la industria. Las operaciones de mezclado se usan con una gran variedad de propósitos. Se requiere, usualmente, que exista un buen mezclado para favorecer la homogenización de los campos térmico y/o de concentración, para así obtener buenos resultados de producción en un tiempo razonable. La operación de mezclado puede llevarse a cabo de manera mecánica, por inyección o mediante la interacción con un campo magnético.

El mezclado del tipo mecánico es aquel en el cual se utiliza una propela o aspa, conectada a un motor mecánico, para agitar a un sistema [8]. Existen diferentes tipos de propelas; algunos ejemplos se muestran en la Figura 2.1.

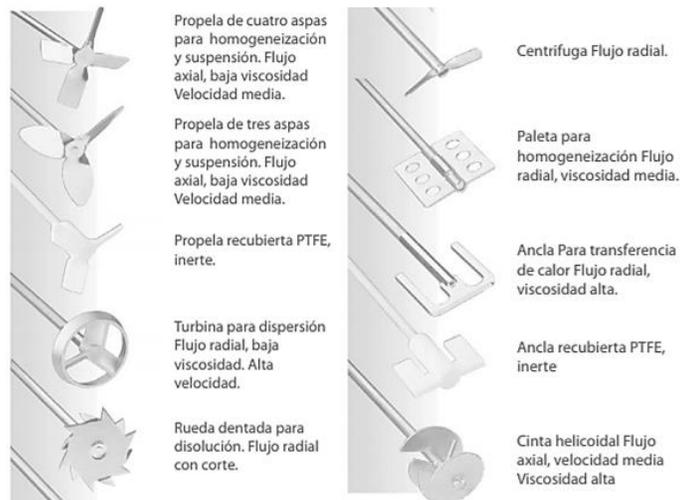


Figura 2.1. Ejemplos de propelas para agitación mecánica (modificada de [8]).

Por otra parte, el mezclado de unidades de proceso por inyección, consiste en la adición de un fluido en otro a través de una tobera; la inyección puede

realizarse por el fondo, por un lado o por arriba del reactor [9]. Ejemplos de unidades de proceso en la industria metalúrgica en las que se agita el baño metálico mediante inyección son: la fabricación de acero en un BOF [10], la conversión de cobre en el reactor *Peirce-Smith* [11] y la desgasificación de aluminio [12], entre otras.

El mezclado mediante la interacción con un campo electromagnético se basa en la aplicación de un campo magnético, el cual interacciona con corrientes eléctricas inducidas en el metal fundido para mezclarlo. Ejemplos de este tipo de agitación son los hornos de inducción [13], el bombeo electromagnético [14], las operaciones de colada continua en presencia de un campo magnético [15], la refinación con electro-escoria [16] y la operación de la celda Hall-Hérault en el electro-beneficio del aluminio [17], entre otros.

## **2.2 Modelado físico**

El modelado físico de procesos de obtención de materiales o de manufactura de componentes ingenieriles, consiste en realizar observaciones y mediciones, relacionadas con la respuesta de un modelo (usualmente a escala) de un reactor industrial – denominado “prototipo” – cuando se le somete a una carga. Szekely *et al.* [2] han clasificado a los modelos físicos en tres grandes grupos:

1. Modelos rigurosos: contruidos respetando cuantitativamente criterios de similitud, por lo que los resultados cuantitativos pueden ser traducidos y enfocados al estudio del sistema real.
2. Modelos aproximados: son aquellos cuyos resultados no pueden escalarse directamente al prototipo pero que proporcionan datos valiosos para la construcción de un modelo matemático. El comportamiento de algunos aspectos del sistema real se podría predecir a partir de este tipo de modelo físico.

3. Modelos *ad hoc*: se diseñan para tener un primer acercamiento a un sistema, antes de realizar un modelo matemático, a fin de que el modelo físico sea un apoyo preliminar al modelo matemático. También pueden diseñarse para probar alguna técnica de visualización o de medición.

Aunque un modelo físico se construye con materiales distintos a los del prototipo y opera bajo condiciones diferentes, la respuesta del modelo físico debe ser equivalente a la respuesta del prototipo para que se tenga una representación realista.

### **2.3 Modelado matemático**

Los modelos matemáticos consisten en una serie de ecuaciones algebraicas y/o diferenciales que representan cuantitativamente un proceso o algún aspecto importante de éste [2]. Los modelos matemáticos se pueden agrupar en tres tipos:

- 1.- Modelos teóricos: que están enfocados hacia un estudio mecanístico de algún proceso.
- 2.- Modelos semi-empíricos: que se basan en leyes físicas pero tienen cierto grado de empirismo, ya que la complejidad del modelo obliga a establecer simplificaciones diversas o las soluciones no existen por lo que sin estas consideraciones sería muy difícil resolverlos.
- 3.- Modelos de entrada-salida: que representan una relación totalmente empírica entre las variables más representativas del proceso.

Es común que los modelos físicos y matemáticos se utilicen de manera combinada para estudiar un proceso de interés. Usualmente los resultados de los primeros se usan para validar a los segundos.

## **2.4 Tiempo de mezclado**

El tiempo de mezclado es un parámetro importante en las operaciones de mezclado; existen dos tipos de tiempo de mezclado: local y global. El tiempo de mezclado local es el tiempo necesario para que la respuesta de un sistema sea tal que la composición química (o la temperatura) alcance un valor constante en un punto específico del reactor [18]. Las técnicas más utilizadas para estimar el tiempo de mezclado local se basan en: 1) la adición de soluciones salinas (midiendo la evolución de la conductividad eléctrica) y 2) la adición de trazadores ácidos (midiendo la evolución del pH).

En contraste con el tiempo de mezclado local, el tiempo de mezclado global es el tiempo necesario para que todo el sistema esté completamente mezclado. Puede determinarse visualmente a partir de videograbaciones cuando se agrega un trazador colorido al sistema o bien midiendo el máximo valor del tiempo de mezclado local.

## **2.5 Patrón de flujo del fluido**

Las condiciones de los procesos metalúrgicos (altas temperaturas, sistemas reactivos) no son favorables para estudiar ni a los fenómenos de flujo de fluidos ni a parámetros como el tiempo de mezclado local. En contraste, los modelos físicos hacen posible el estudio del flujo de fluidos con materiales y condiciones distintos, pero equivalentes a los del prototipo. Así, se ha reportado análisis de video o de imágenes obtenidos de modelos físicos para el estudio del flujo de fluidos en diversos reactores [19 - 21].

Como un ejemplo del uso de las herramientas de Ingeniería de Procesos para estudiar el patrón de flujo de un fluido se puede citar a Thomas *et al.* [22], quienes modelaron física y matemáticamente un molde de colada continua para estudiar procesos de solidificación, que dependen de la fluidinámica del acero en el molde. En sus resultados incluyeron el campo de velocidad y el campo de concentración de un trazador colorido para evidenciar el patrón del flujo del fluido, como se muestra en la Figura 2.2. Los vectores de velocidad obtenidos con el modelo matemático están superpuestos a una imagen de la distribución del trazador (obtenida de un modelo físico); ambos resultados muestran parecido evidente por lo que se dice que el modelo matemático ha sido validado. Debe hacerse énfasis en que los resultados del modelo físico mostrados en esa imagen (distribución de la concentración del trazador colorido) son cualitativos.

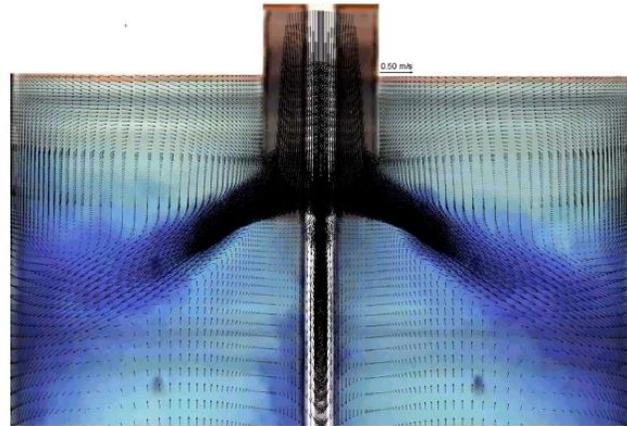


Figura 2.2. Vectores de velocidad (calculados con un modelo matemático) superpuestos a una imagen de un modelo físico de un molde de colada continua [22].

## 2.6 Patrón de flujo del trazador

Hay muy pocas investigaciones acerca de la trayectoria del trazador. En uno de los pocos ejemplos reportados, *Srigrarom* y *Koh* [23] realizaron un estudio sobre aletas oscilantes, que se utilizan para suprimir la intensidad de las ondas del océano que se acercan a la superficie. Con el modelo físico pudieron caracterizar la fluidinámica del sistema mediante la adición de un trazador colorido; se obtuvieron imágenes que muestran la distribución del colorante cuando la aleta oscila y su cambio de ruta cuando se encuentra con el movimiento provocado por las orillas de la aleta (Figura 2.3). Para caracterizar con detalle el comportamiento del sistema realizaron pruebas con la técnica de *PIV* (*Particle Image Velocimetry*), obteniendo un campo de velocidad como el que se muestra en la Figura 2.4.

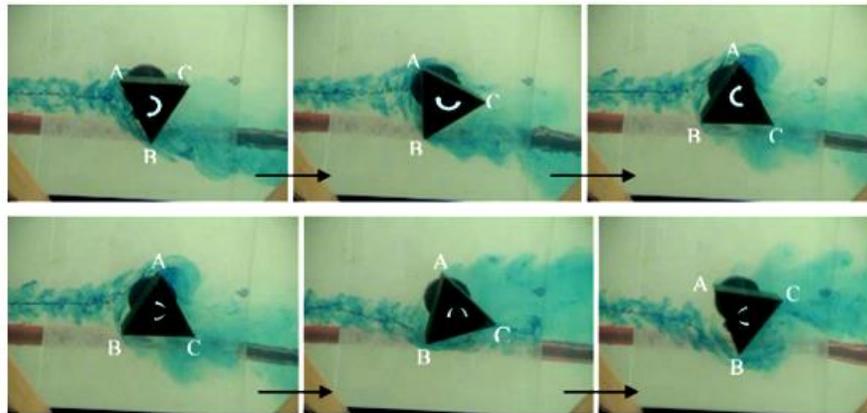


Figura 2.3. Trayectoria del trazador debido a la oscilación de la aleta [23].

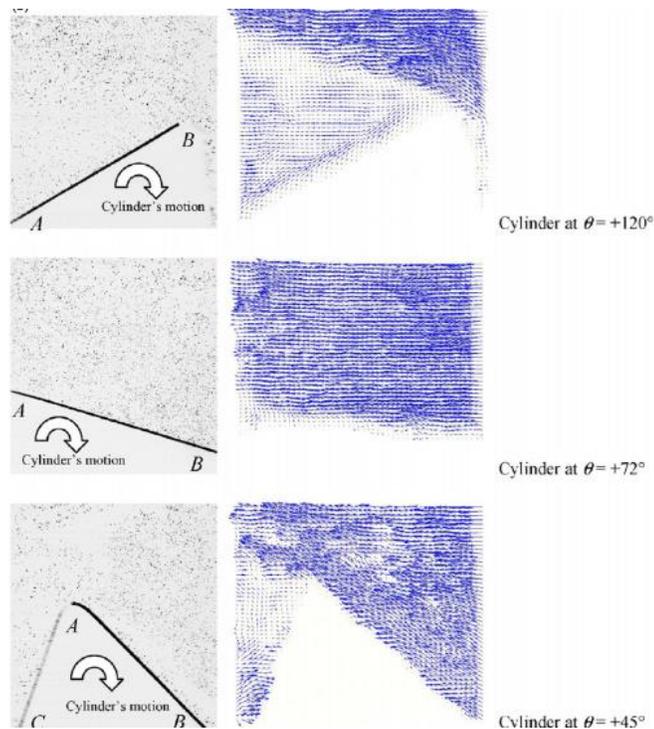


Figura 2.4. Campo de velocidad, medido mediante *PIV*, de la aleta oscilante para tres valores de  $\theta$  [23].

A pesar de que hay un gran número de modelos físicos y matemáticos de diversos procesos reportados en la literatura, no hay técnicas simples (y, por tanto, económicas) que puedan utilizarse para determinar la evolución del campo de concentración de un colorante mientras se desplaza en un baño líquido. En este sentido, se puede plantear que el procesamiento de una secuencia de imágenes obtenidas después de adicionar un trazador colorido en un modelo físico puede generar información cuantitativa que está directamente relacionada con la evolución de la concentración del trazador. Este es el objetivo general de la técnica que se desarrolló en este trabajo.

### 3 Procedimiento experimental

#### 3.1 Dispositivo experimental

Dado que el objetivo del trabajo es el desarrollo de una técnica para determinar la evolución de mapas de acidez en un modelo físico, se decidió trabajar con un modelo físico *ad hoc*, por lo que no fue necesario utilizar criterios de similitud. El modelo físico *ad hoc* consiste de un recipiente de acrílico de 22 cm (largo) × 15 cm (alto) × 11 cm (profundidad) conteniendo agua a temperatura ambiente, al que se le insufla aire mediante una boquilla horizontal. Cabe mencionar que el agua se utiliza comúnmente en modelos físicos de procesos metalúrgicos debido a que su viscosidad cinemática a temperatura ambiente es similar a la del acero líquido a 1600 °C. El sistema completo se muestra en la Figura 3.1. El fluido se agitó con aire insuflado usando una lanza de acero en forma de “L”, con una boquilla de 1.59 mm de diámetro; el flujo de aire se alimentó mediante una compresora marca *Evans* de 235 L de capacidad y se controló con un rotámetro marca *Cole Parmer*. El flujo de aire se mantuvo constante a 3 LPM, con lo que se obtiene una pluma y nivel de agitación estables. En la línea de alimentación de aire al modelo se colocaron filtros para eliminar agua y aceite.

La evolución del campo de color se generó agregando el trazador, mediante una jeringa sin aguja, en una posición ubicada entre la pluma generada por el aire de mezclado y la sección vertical de la lanza; el trazador es una mezcla de una disolución acuosa de anilina azul<sup>1</sup> (60 g/L) y una disolución acuosa de ácido sulfúrico 2:1 (agua: ácido sulfúrico<sup>2</sup>). Con este trazador se obtuvo una gama de colores que permitió realizar el análisis de imágenes. El sistema se iluminó con una lámpara de luz blanca de 35 W, ubicada arriba del modelo físico. La evolución del campo de color se videograbó usando una cámara de

---

<sup>1</sup>#1710 código 70007

<sup>2</sup> 98% de pureza

video comercial (30 cuadros por segundo), colocada en un plano normal a la cara larga del recipiente. Al mismo tiempo, se midió y grabó la evolución del pH mediante un electrodo cuya punta estaba ubicada en la cara opuesta a la lanza, a 2 cm de dicha cara y a 2 cm de profundidad en el agua; con esta configuración el trazador se mueve del punto de inyección hacia la cara angosta opuesta, lo que permite obtener imágenes útiles para probar la metodología propuesta dado que el frente de color se distingue con claridad y avanza a una velocidad relativamente lenta (lo que permite usar una cámara de video comercial). Dado que no es el interés primordial, no se buscó medir el tiempo de mezclado local en la posición que resulta en el mayor valor de ese parámetro (y que correspondería también al tiempo global de mezclado). Para registrar el pH se empleó un pH-metro marca *IQ Scientific Instruments*, modelo IQ270GB, con un electrodo marca *Van London*, modelo *PHOENIX*, conectado a una *laptop* y controlado con el *software Smartlogger II*. La frecuencia de adquisición de datos fue de 1s.

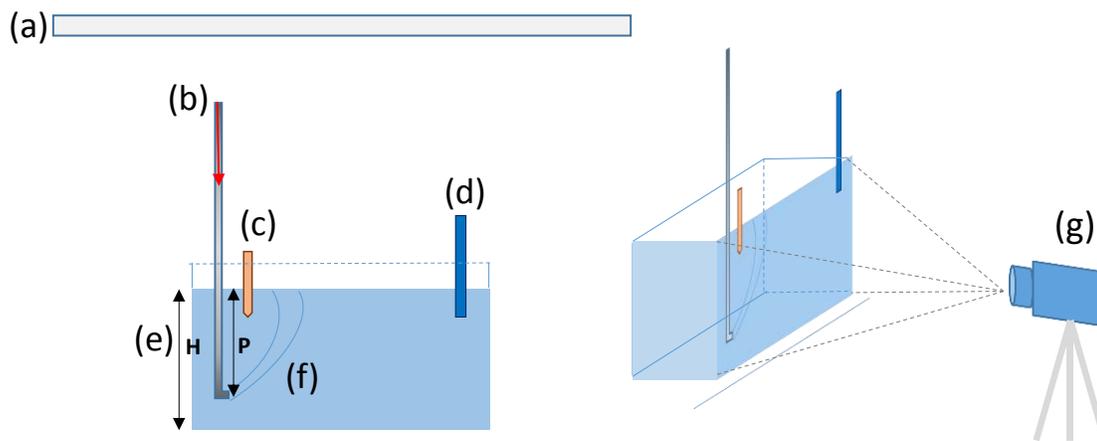


Figura 3.1.-Representación esquemática del dispositivo experimental: (a) lámpara de luz blanca, (b) lanza de acero, (c) jeringa para inyectar al trazador, (d) electrodo, (e) modelo de acrílico, (f) pluma de aire inyectado y (g) cámara de video. Las variables altura del baño y profundidad de la lanza se muestran como “H” y “P” (con una relación de 4:3 con respecto a la altura total del agua), respectivamente. La flecha en color rojo indica la dirección del flujo de aire.

### 3.2 Patrón de calibración

Dado que es necesario conocer la equivalencia entre el valor local del color (en escala *RGB*<sup>3</sup>) y el valor local del pH, se generó un patrón de calibración. Para ello se realizaron los pasos siguientes:

- ❖ Montar el dispositivo experimental como se muestra en la Figura 3.1.
- ❖ Registrar el valor del pH inicial.
- ❖ Agregar un volumen dado de trazador (ver Tabla 3.1) y agitar mediante aire insuflado al mismo tiempo que se observa el valor de pH medido.
- ❖ Tomar una fotografía<sup>4</sup>, al observar un cambio en el valor del pH no mayor a  $\pm 0.2$  unidades de pH, para cada una de las adiciones de trazador.
- ❖ Registrar el valor del pH.
- ❖ Realizar otra adición hasta haber agregado 4 mL de trazador.

Los valores de volumen de trazador adicionado en cada paso y del delta de volumen de trazador se muestran en la Tabla 3-1.

---

<sup>3</sup>*RedGreenBlue*

<sup>4</sup> La cámara de video utilizada permite también obtener fotografías

**Tabla 3-1. Volúmen de trazador adicionado.**

<b><math>\Delta</math>Volumen (mL)</b>	<b>Volumen total (mL)</b>
0	0
0.1	0.1
0.1	0.2
0.1	0.3
0.1	0.4
0.1	0.5
0.05	0.55
0.05	0.6
0.05	0.65
0.05	0.7
0.1	0.8
0.2	1
1	2
1	3
1	4

### **3.3 Evolución del campo de color y del pH local**

Para generar simultáneamente: 1) un campo de color que varíe con el tiempo y 2) la respuesta local del pH, se utilizó el mismo sistema de la Figura 3.1, siguiéndose el procedimiento que se describe a continuación:

- ❖ Montar el dispositivo experimental como se muestra en la Figura 3.1.
- ❖ Establecer un flujo de aire de 3LPM.
- ❖ Iniciar, simultáneamente, la adquisición de datos y la videograbación.
- ❖ Inyectar (después de 10 s de haber iniciado la adquisición de datos y la videograbación) 1 mL de trazador, con una jeringa de 5 mL de capacidad (sin aguja).
- ❖ Detener la adquisición de datos y la videograbación al observar un cambio de valor de pH no mayor a  $\pm 0.2$  unidades de pH.

## 4 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del trabajo experimental. Primero, se muestra el patrón de calibración *RGB* vs. pH obtenido. Luego se presentan imágenes y valores de pH obtenidos con un trazador de distinta concentración de ácido, que se usarán para verificar la validez de la metodología propuesta. Después, se muestra el avance del trazador colorido, mediante una secuencia de imágenes extraídas del video. Finalmente, se presenta la respuesta local del sistema (en términos de pH).

### 4.1 Patrón de calibración

Para calibrar la relación entre los valores de *RGB* y de pH, se generó un patrón de colores como se describió en el Capítulo 3. Las imágenes y los valores de pH resultantes se muestran en la Figura 4.1. Se observa que existen tonalidades azules para los valores de pH cercanos al neutro y, a medida que se va acidificando con el trazador colorido, las tonalidades cambian a tonos verdes. Este cambio de tonalidad ocurre cuando se adicionan entre 0.60 y 0.70 mL totales de trazador. Nótese que el cambio de tonalidad es sensible al cambio de pH para valores mayores a aproximadamente 3 unidades de pH. En la Tabla 4.1, puede verse que hay un cambio notorio a la vista de la tonalidad azul a la verde entre 4.86 y 3.12 de pH. De los experimentos de evolución del campo de color (cuyos resultados se describirán más adelante) se sabe que el valor final de pH es de aproximadamente 3 unidades.

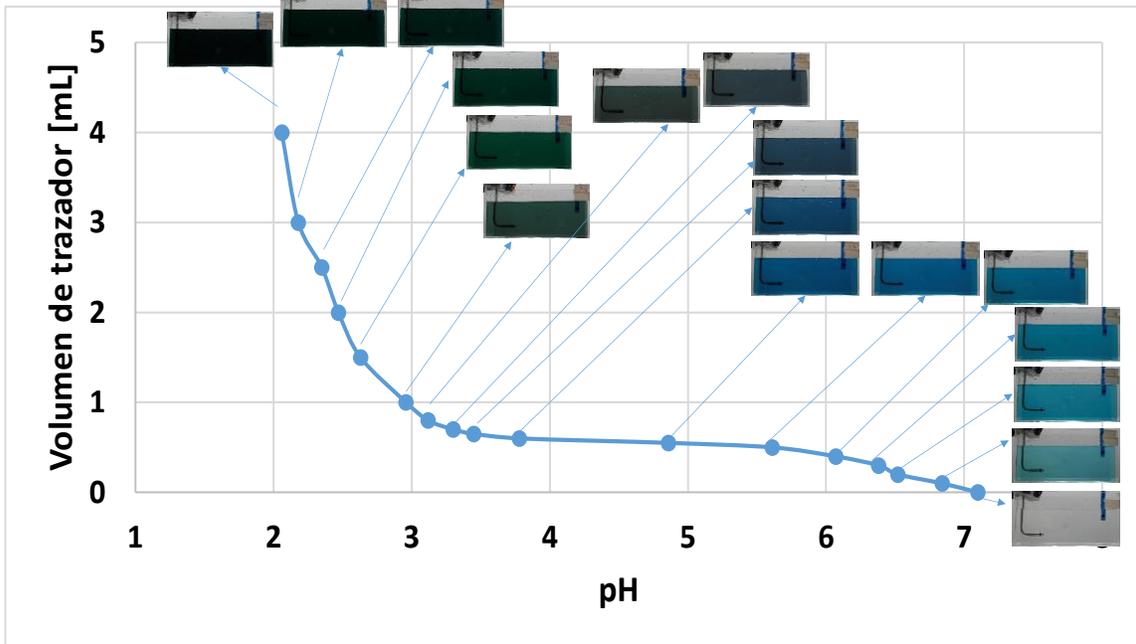
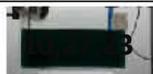


Figura 4.1. Curva patrón de color y pH, resultante de la adición incremental de diversos volúmenes de trazador (60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 2:1). El volumen total adicionado del trazador se muestra en el eje de las ordenadas.

Tabla 4-1. Relación de imágenes de patrones con pH.

IMAGEN	IMAGEN	RGB	pH
		146,148,147	7.1
		82,118,126	6.84
		57,107,127	6.52
		42,94,119	6.38
		31,83,115	6.07
		25,78,119	5.61
		21,69,107	4.86
		30,65,96	3.78
		42,60,77	3.45
		49,58,65	3.3
		46,56,53	3.12
		45,64,57	2.96
		13,55,41	2.63
		10,43,35	2.47
		10,33,29	2.35
		10,27,23	2.18
		11,18,17	2.06

## 4.2 Respuesta del sistema con un trazador distinto

Para obtener más información acerca de los patrones de calibración se realizó una prueba con un trazador distinto, que consiste en una mezcla de 60 g de colorante / 1 L de solución acuosa (1:1 de ácido sulfúrico). Los resultados se muestran en la Figura 4.2; se puede observar una tendencia similar a la de la curva patrón, pero los tonos son distintos.

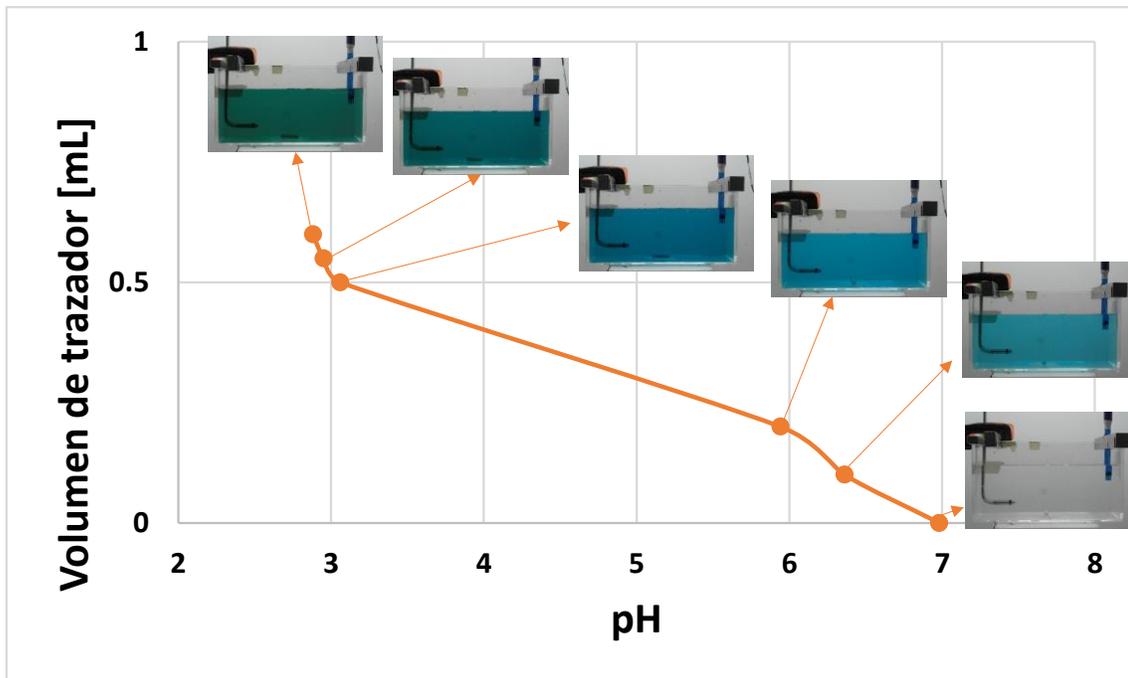


Figura 4.2. Curva de color y pH, resultante de la adición incremental de diversos volúmenes de trazador (60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 1:1). El volumen total adicionado del trazador se muestra en el eje de las ordenadas.

## 4.3 Evolución del campo de color

En la Figura 4.3 se muestra la secuencia de imágenes correspondientes a la videograbación de la evolución del campo de color como consecuencia de la inyección de aire mediante la tobera lateral, en intervalos de 1 segundo, a partir de los 9 segundos de iniciada la misma (recuérdese que el trazador se adiciona

a los 10 s). Inicialmente, el trazador se concentra en la zona de la pluma generada por el aire insuflado y, poco a poco, avanza hacia las caras angostas del modelo. La zona a la izquierda de la pluma alcanza un tono uniforme de color en un tiempo relativamente corto, mientras que la última zona en mezclarse es la opuesta: la derecha (donde está posicionado el electrodo). Como se mencionó anteriormente, esto permite analizar la eficacia de la metodología propuesta.

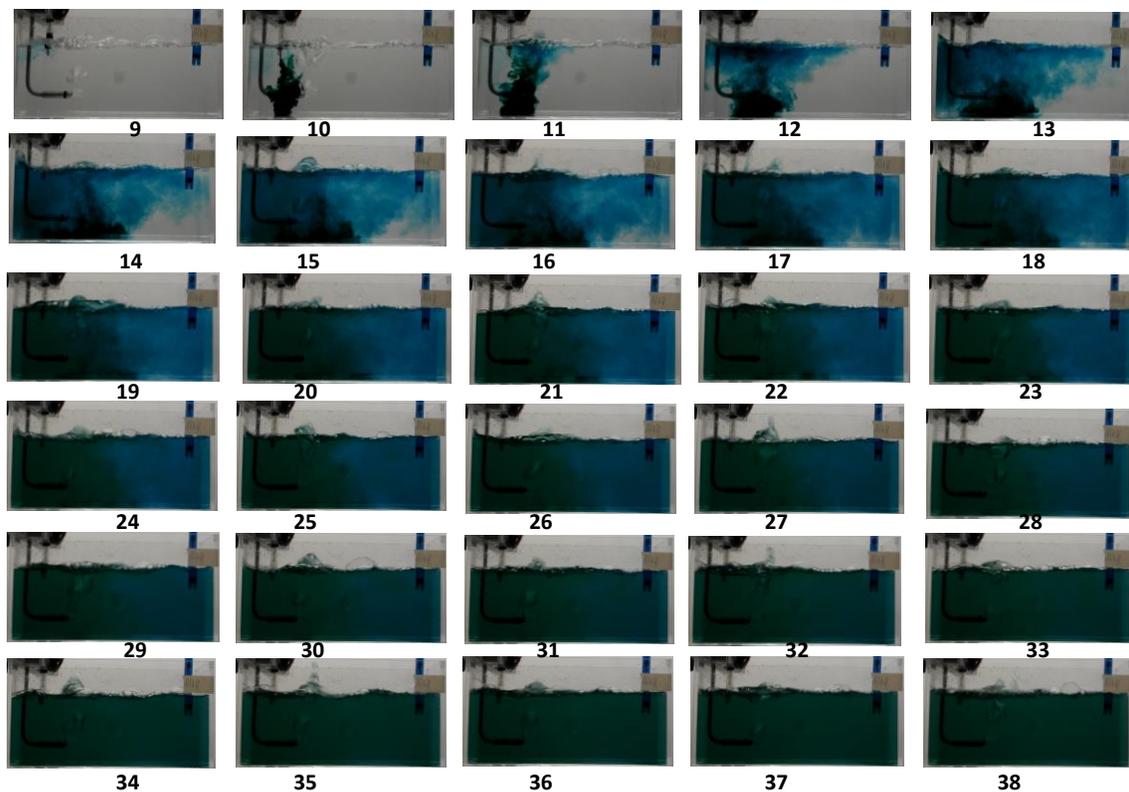


Figura 4.3. Secuencia de imágenes resultante de la adición de 1 mL de trazador, con inyección de aire de 3 LPM; los valores debajo de cada imagen son el tiempo (en segundos), referido al instante del inicio de la videograbación.

A los 33 segundos de haber realizado la inyección se nota un color verde oscuro homogéneo pero, para determinar el tiempo global de mezclado se consideraron 5 segundos más (para asegurar el mezclado del trazador que la vista no pueda precisar). Así, el mezclado completo del trazador en el baño finaliza aproximadamente a los 38 segundos. Este es el valor del tiempo global de mezclado asignado para este sistema.

#### 4.4 Respuesta local del sistema (pH vs. tiempo)

La respuesta local del sistema (pH vs. t) producida por la adición del trazador se muestra en la Figura 4.4. El trazador se agregó a los 10 s de haber iniciado la adquisición de datos; a los 21 s se observa el inicio de una disminución en el pH, alcanzándose un valor de pH casi constante a partir de los 35 s, aproximadamente.

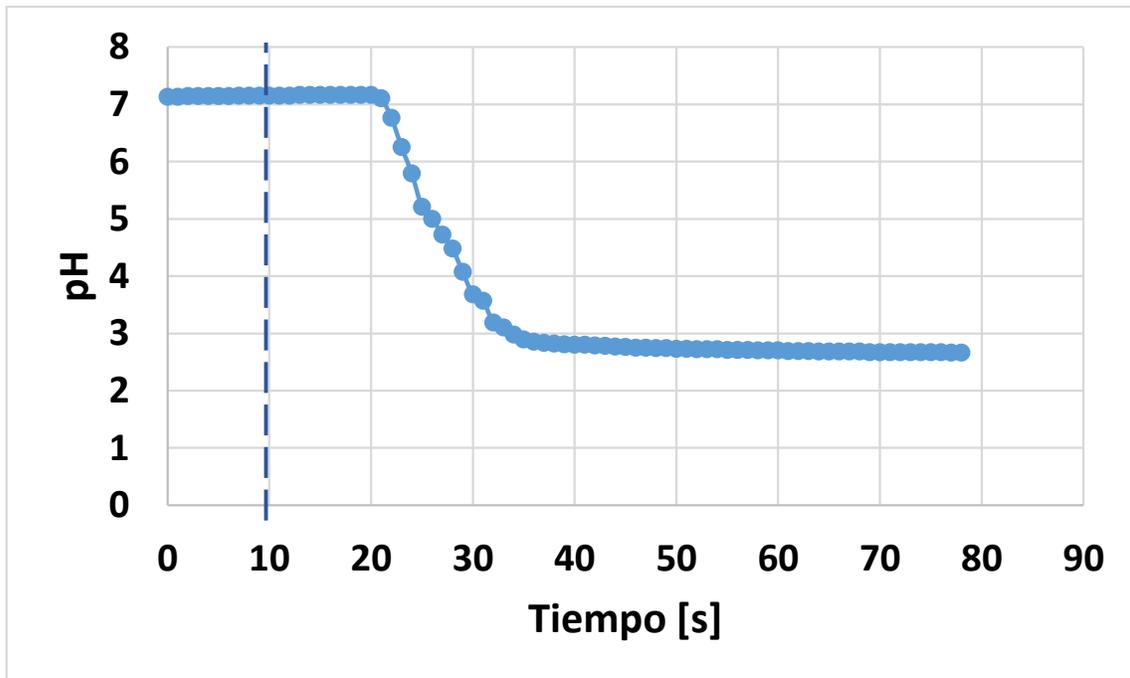


Figura 4.4. pH local como función del tiempo, resultante de la adición de 1 mL de trazador, con un flujo de aire de 3 LPM. La línea punteada vertical indica el instante en el que se adicionó el trazador.

## 5 Análisis de resultados y discusión

Para alcanzar el objetivo planteado, fue necesario relacionar las imágenes extraídas de la videograbación con alguna cantidad medida, la cual fue el pH. Las imágenes pueden revelar el avance del trazador ácido puesto que es colorido y, además, esta propiedad es sensible al cambio de pH (como se demostró con la curva patrón, ver Figura 4.1). Este Capítulo comienza con la descripción de la serie de acciones llevadas a cabo para realizar la lectura de los valores de *RGB* de las diversas imágenes manejadas en este estudio. Después se describe la determinación de los valores de *RGB* de la curva patrón (que son el punto de comparación para el video), así como la validación del patrón *RGB*-pH. Para comparar el pH medido en los experimentos realizados para determinar la curva patrón con el *RGB* leído del procesamiento de imágenes, se tiene que validar que la relación existe y funciona; por ello, se presentan graficas que relacionan dichas cantidades. Por último, a manera de aplicación de este estudio, se presentan mapas de pH en formato de gráficos de contorno para el sistema de interés.

### 5.1 Determinación de los valores de *RGB* a partir de una imagen

El color de una subregión de cada imagen obtenida en este trabajo puede asociarse, mediante la escala de color *RGB*, a un valor único de pH por lo que sirve para indicar la distribución de color (y por tanto de pH) del trazador en el modelo, ya sea para una condición de mezcla completa o a medida que va transcurriendo el tiempo durante el mezclado.

Para determinar los valores de color - en escala *RGB* - de cada muestra de las imágenes de interés se utilizó el software *Mathematica 9.0*. En particular, se utilizó el comando `PixelValue[IMAGEN,{X1;;X2,Y1;;Y2}, "Byte"]` (ver Figura 5.1), que arroja los valores *RGB* de cada pixel de la imagen procesada.

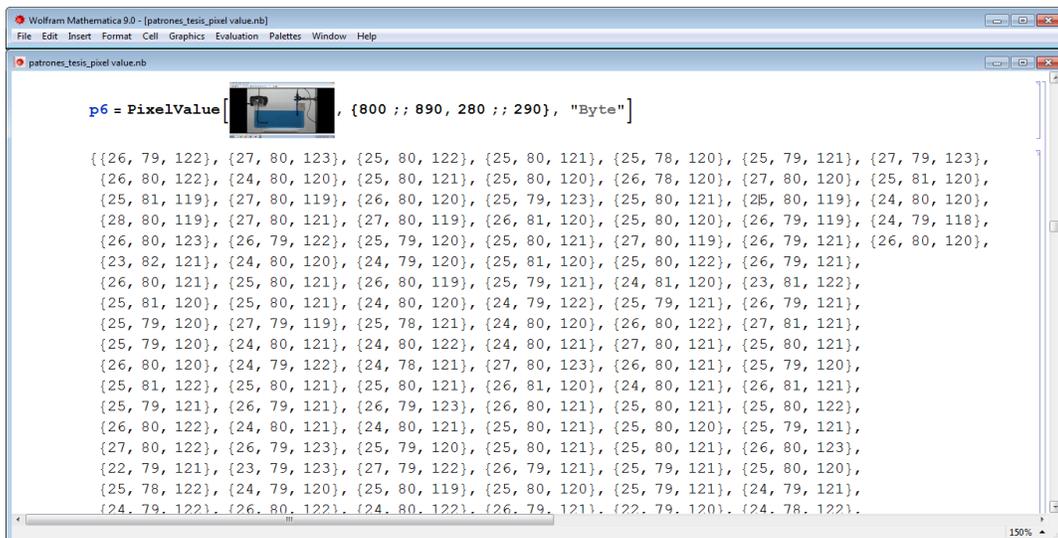


Figura 5.1. Impresión de pantalla para mostrar el uso del comando *PixelValue*.

*Mathematica* 9.0 permite posicionarse en un plano *XY* (cuyo origen está en la parte inferior izquierda de la imagen) y en ese plano seleccionar un área específica (ver, a manera de ejemplo, la Figura 5.2). Los datos resultantes se muestran en la pantalla en el formato  $\{R, G, B\}$ ; el valor máximo que puede tomar cada uno de estos parámetros es de 255 y el mínimo es de 0. Para poder almacenar los datos se genera un archivo ASCII mediante el comando `Export["file.txt", variable]` en *Mathematica* para su posterior procesamiento.

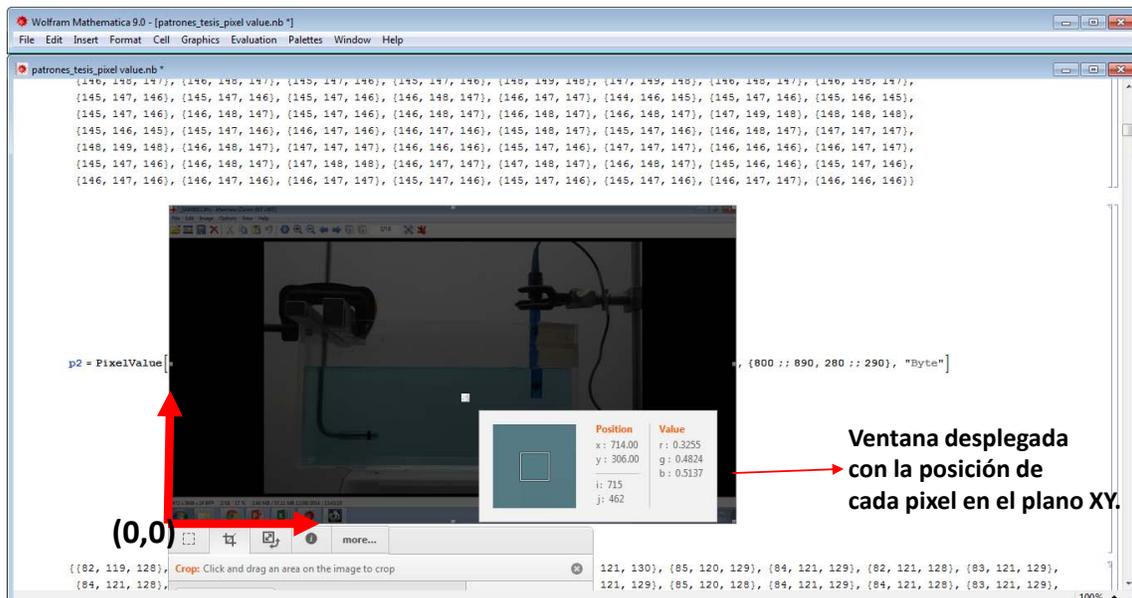


Figura 5.2.- Ventana de trabajo de *Mathematica 9.0*, mostrando el sistema de referencia y una posición y área de muestreo del tamaño de un pixel.

Una vez obtenidos los valores de *RGB*, éstos se procesan con un programa de cómputo desarrollado en *dev-PASCAL* [24] siguiendo la secuencia de cálculo mostrada en la Figura 5.3. Se comienza generando la relación entre el pH y los valores de *RGB* de la curva patrón (ver apartado siguiente) y alimentando esa información junto con la imagen de interés al bloque de tratamiento de datos; la imagen puede ser la de un punto en la curva patrón o una de las imágenes de la secuencia que se obtiene con la videograbación. Dado que en cada región de muestreo hay varios pixeles, es necesario promediar los valores de *RGB* obtenidos con *Mathematica*, mediante el programa desarrollado en *dev-PASCAL*. Finalmente, se realiza una interpolación para determinar el valor de pH correspondiente a esa región de muestreo.

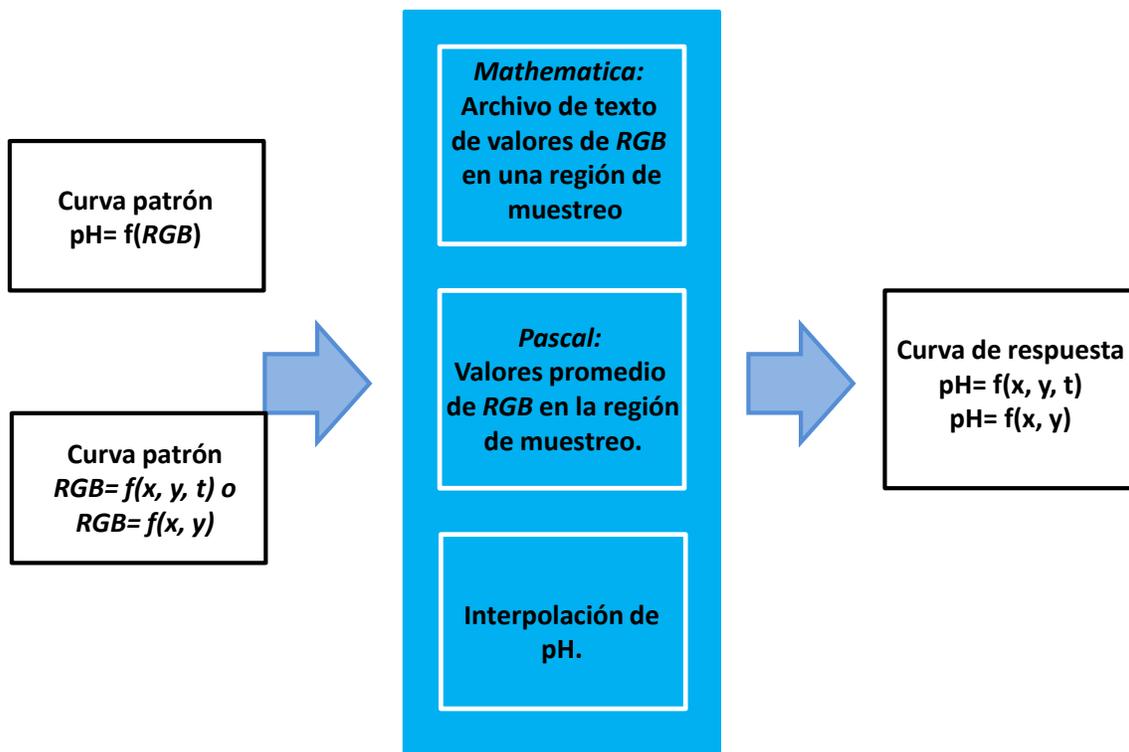


Figura 5.3.- Esquema del tratamiento de los resultados.

## 5.2 Determinación de los valores de *RGB* para las imágenes patrón

Para construir una tabla de equivalencia entre los valores de *RGB* y el pH medido en las imágenes del patrón de color, se inició seleccionando una zona de muestreo, tal como se indica (área dentro del rectángulo rojo) en la Figura 5.4. Esta área tiene la característica de ser de color uniforme y estar ubicada cerca de la punta del electrodo de pH

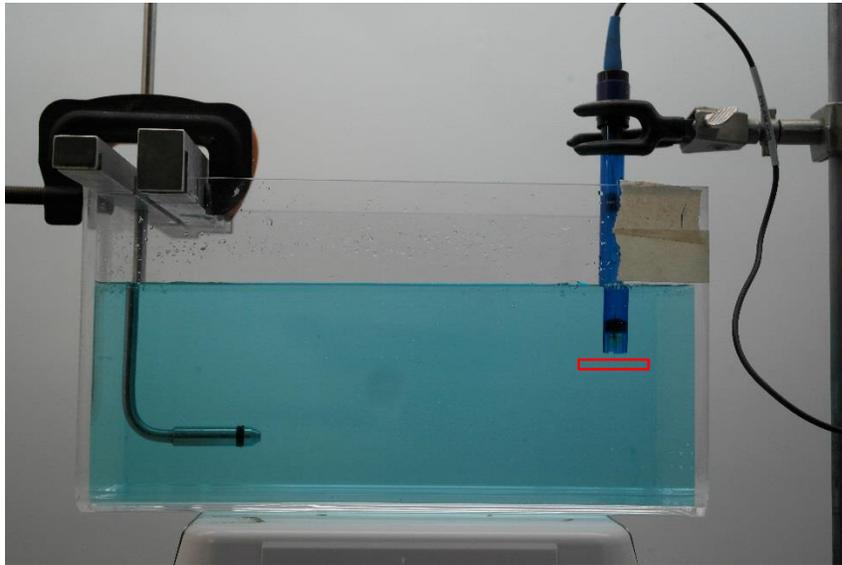
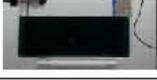


Figura 5.4. Zona de muestreo para la lectura del valor de *RGB* de cada imagen de la curva patrón.

La posición *XY* de cada esquina del área de muestreo en la imagen de la Figura 5.4 se alimentó a *Mathematica* 9.0 para obtener, mediante el comando *PixelValue*, un documento de texto el cual contiene los valores *RGB* de cada pixel dentro de la zona de muestreo. El número de pixeles leídos por cada imagen de la curva patrón fue de 900. Estos valores se promediaron (usando el programa desarrollado en *dev-PASCAL*), obteniéndose un valor *RGB* promedio, de (82,118,126) para el caso de la Figura 5.4.

En la Tabla 5-1 se muestran los valores *RGB* (obtenidos con *Mathematica* y *dev-PASCAL*) correspondientes a cada imagen de la curva patrón, junto con el pH medido. Puede notarse que valores altos de *RGB* están asociados con un tono transparente mientras que los valores bajos corresponden a un tono oscuro.

**Tabla 5-1. Resultados de *RGB* y pH de las imágenes de la curva patrón.**

<b>IMAGEN</b>	<b>RGB</b>	<b>pH</b>
	<b>146,148,147</b>	<b>7.1</b>
	<b>82,118,126</b>	<b>6.84</b>
	<b>57,107,127</b>	<b>6.52</b>
	<b>42,94,119</b>	<b>6.38</b>
	<b>31,83,115</b>	<b>6.07</b>
	<b>25,78,119</b>	<b>5.61</b>
	<b>21,69,107</b>	<b>4.86</b>
	<b>30,65,96</b>	<b>3.78</b>
	<b>42,60,77</b>	<b>3.45</b>
	<b>49,58,65</b>	<b>3.3</b>
	<b>46,56,53</b>	<b>3.12</b>
	<b>45,64,57</b>	<b>2.96</b>
	<b>13,55,41</b>	<b>2.63</b>
	<b>10,43,35</b>	<b>2.47</b>
	<b>10,33,29</b>	<b>2.35</b>
	<b>10,27,23</b>	<b>2.18</b>
	<b>11,18,17</b>	<b>2.06</b>

Para validar la metodología descrita se decidió: 1) usar un *software* de presentaciones con diapositivas para generar artificialmente los colores obtenidos en los experimentos para determinar la curva patrón y así corroborar que la lectura de color en la escala *RGB* es válida y 2) utilizar un trazador distinto al usado para los patrones (en este caso fue más ácido), para verificar que los tonos que se producen con este nuevo trazador son distintos.

La escala de color *RGB* es universal, por lo que muchos paquetes de *software* la utilizan para generar colores cuando se fijan los valores de contraste y brillo. Por ello se pueden generar en, por ejemplo, *Microsoft PowerPoint* regiones de color uniforme con una combinación única de valores de *RGB*. En la Figura 5.5 se muestran imágenes tomadas de la curva patrón con los valores de *R, G* y *B* que se determinaron de la manera en la que se explicó líneas arriba y que se resume en la Tabla 5.1; también se muestran cuadros monocromáticos generados en *Microsoft PowerPoint* para esos mismos valores de *R, G* y *B*. La similitud en los colores indica que la operación con la que se determinaron los valores de *RGB* (usando *Mathematica 9.0* y *PASCAL*) es correcta.

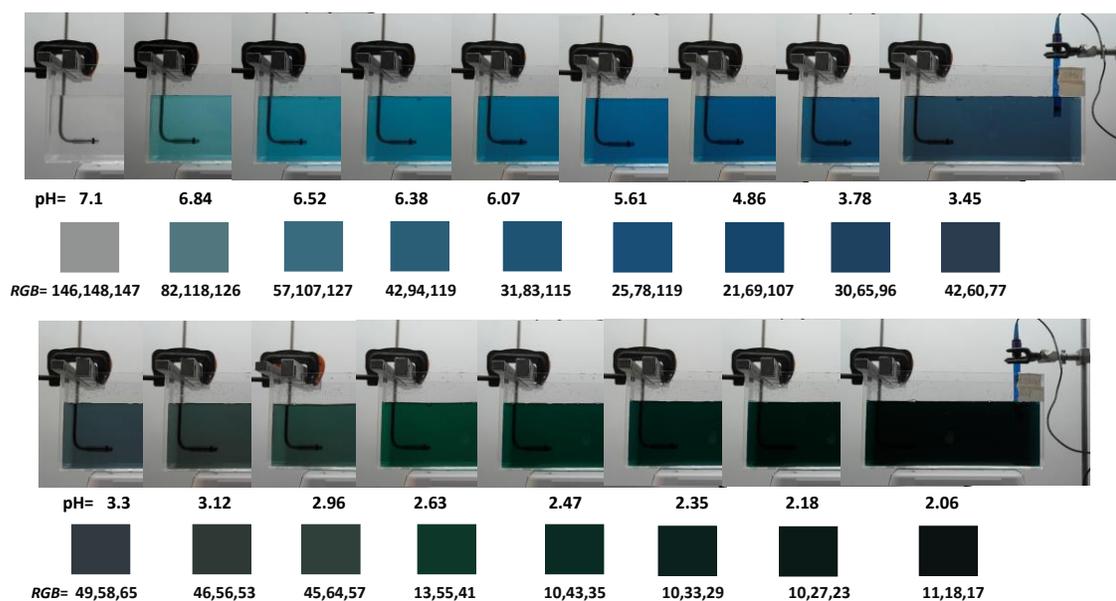


Figura 5.5. Imágenes de la curva patrón (con el valor de pH correspondiente) e imágenes producidas mediante *Microsoft PowerPoint* para los valores de *RGB* indicados.

El color de cada imagen de la curva patrón depende de la iluminación, del tono del fondo y de las sombras que pudiese haber. Aunque se procuró cuidar estos aspectos, la lectura de *RGB* es precisa en *Mathematica* por lo que pudiese haber una pequeña variación de color (por ejemplo en la primera fotografía de la Figura 5.5, cuyo pH es 7.1).

Por otra parte, se agregaron 0, 0.1, 0.2, 0.5, 0.55 y 0.6 mL de un trazador distinto (60 g de colorante/L de solución acuosa 1:1 de ácido sulfúrico) al usado para la curva patrón, con el objetivo de obtener imágenes distintas a las de ésta, que pudieran utilizarse para realizar otro tipo de validación del procedimiento propuesto. La curva resultante se mostró en la Figura 4.2.

Las imágenes obtenidas con cada uno de los dos trazadores se muestran en la Figura 5.6. A simple vista, en los primeros 3 casos (a, b y c, correspondientes a adiciones de 0, 0.1, y 0.2 mL de trazador respectivamente) se aprecian tonos de color parecidos entre ambos trazadores. Por otro lado, para los siguientes tres casos (d, e y f, correspondientes a adiciones de 0.5, 0.55 y 0.6 mL de trazador respectivamente), se distingue una variación de tono (azul a verde) de la primer columna con respecto a la segunda. Esto se debe a que la primer columna corresponde a las imágenes producidas con una disolución más ácida, por lo que con menor volumen cambia a un tono verde, ya que alcanza valores más ácidos con menor cantidad de trazador (la cantidad de colorante en ambas disoluciones tiene un valor constante de 60 g/L, solo se varía la cantidad de ácido).

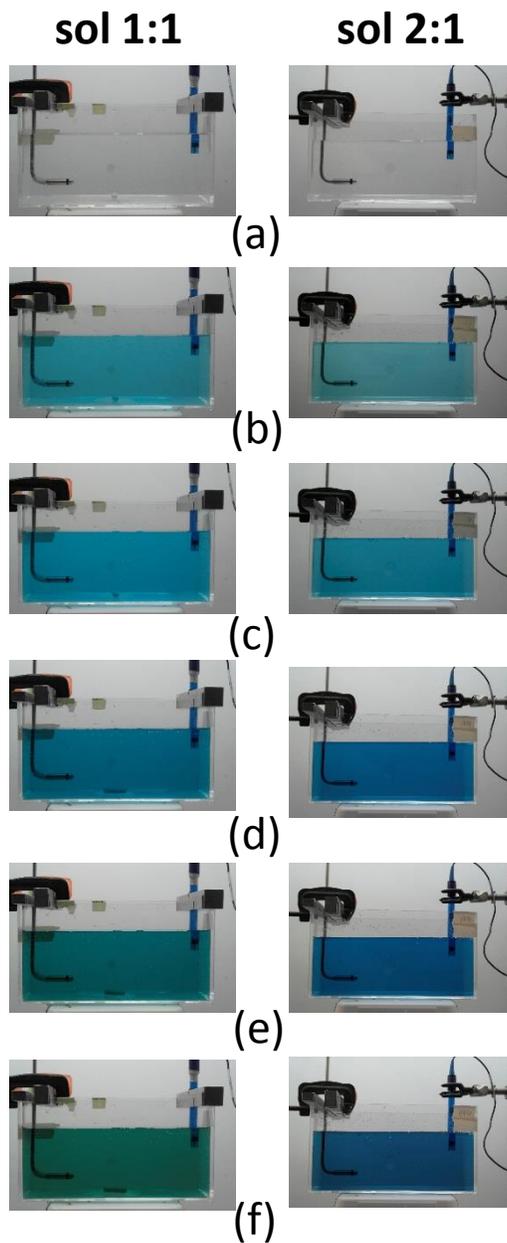


Figura 5.6. Imágenes obtenidas con dos trazadores distintos: columna 1: trazador 60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 1:1, columna 2: trazador 60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 2:1. a) 0.1 mL, b) 0.2 mL, c) 0.5 mL, d) 0.55 mL y e) 0.6 mL, de volumen de trazador adicionado incrementalmente.

En la Figura 5.7 se compara la variación del pH con el volumen de trazador para ambos trazadores; puede apreciarse que la curva color naranja, que corresponde a la del trazador 1:1 de ácido sulfúrico, esta desplazada a la izquierda con respecto a la curva de los patrones cuya concentración de acidez es 2:1 (curva color azul). Su acidez se incrementa en más de 2 unidades con respecto a la curva patrón, al adicionar 0.5 mL de trazador

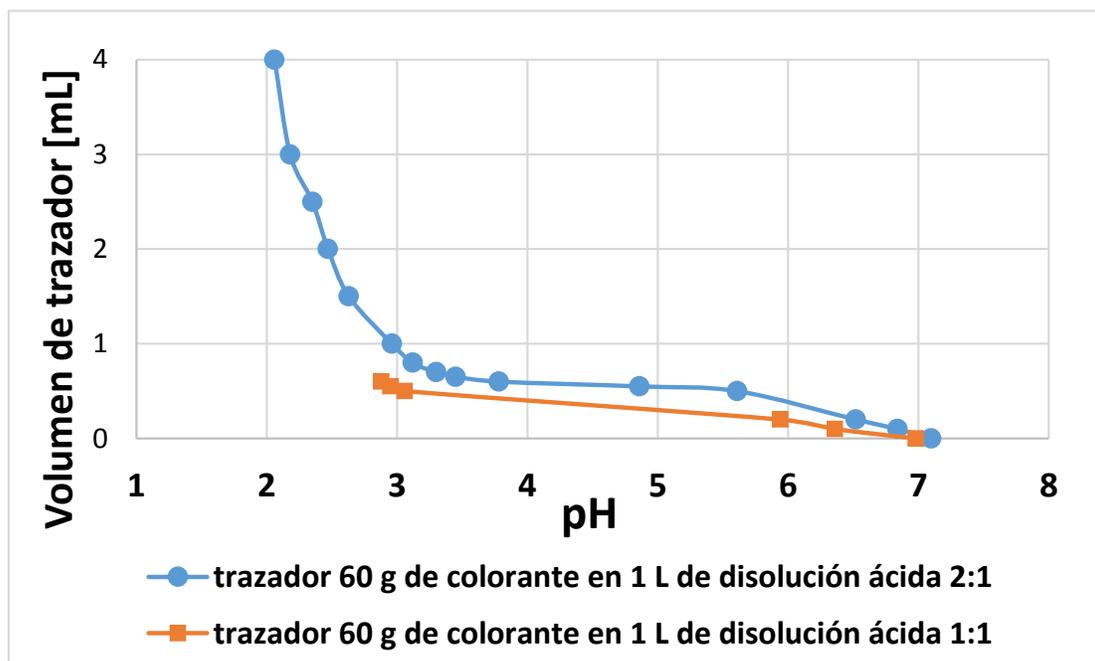
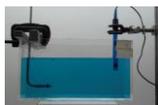


Figura 5.7. Valores de pH para diversos volúmenes de trazador adicionados: 1) trazador 60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 1:1 (curva naranja) y 2) trazador 60 g de colorante en 1 L de disolución ácida 2:1 (curva azul).

Los valores de pH medidos a partir de las imágenes correspondientes a la solución 1:1 de ácido sulfúrico, se comparan en la Tabla 5.2 contra los valores de pH de la curva patrón (solución 2:1 de ácido sulfúrico).

**Tabla 5-2.- Imágenes obtenidas con los dos trazadores. Se muestra también el valor de pH correspondiente.**

<b>Solución 1:1</b>		<b>Solución 2:1</b>	
<b>Imagen</b>	<b>pH</b>	<b>Imagen</b>	<b>pH</b>
	<b>6.98</b>		<b>7.10</b>
	<b>6.36</b>		<b>6.38</b>
	<b>5.94</b>		<b>6.07</b>
	<b>3.06</b>		<b>3.12</b>
	<b>2.95</b>		<b>2.96</b>
	<b>2.88</b>		<b>2.63</b>

Se nota que los colores obtenidos en cada imagen son similares pero no exactamente iguales. Esto puede deberse a que poseen distinto contraste y brillo, porque se realizaron en diferentes días, y además debido a que la cantidad total de gramos de colorante es diferente entre los dos trazadores; por ejemplo, para el segundo par de imágenes se tiene:

**Solución 1:1**

0.1 mL de trazador agregados, que equivale a 0.006 gramos de colorante.

$R, G, B$  y promedio de los valores de  $R, G$  y  $B = 31, 112, 127, 90$

## Solución 2:1

0.3 mL de colorante agregados, que equivale a 0.018 gramos de colorante

$R$ ,  $G$ ,  $B$  y promedio de los valores de  $R$ ,  $G$  y  $B = 42, 94, 119, 85$

Por tanto, los valores de pH son similares pero las imágenes no reflejan el mismo color por lo que, cuando se procesan para obtener los valores de  $RGB$ , se obtienen diferencias evidentes en los valores de  $RGB$ . Esto garantiza que el sistema es sensible al colorante adicionado.

### 5.3 Validación de la relación $RGB$ -pH

Para validar la metodología propuesta, se comparó la respuesta local de pH medida usando el pH-metro con los valores de pH determinados a través de la secuencia de operaciones ilustrada en la Figura 5.3, para el experimento de inyección de aire.

En la Figura 5.8 se grafica la curva pH vs. tiempo obtenida a partir de las mediciones con el pH-metro. Para determinar el tiempo local de mezclado, se calcula primero el 90% de la variación total del pH. De la gráfica se obtiene que el 90% del cambio total de pH es de 4.55 unidades; con esta información se determinó que el tiempo local de mezclado es de 22 s (considerando los 10 segundos previos a la adición del trazador). La imagen del modelo a ese tiempo del proceso, se muestra también en la figura.

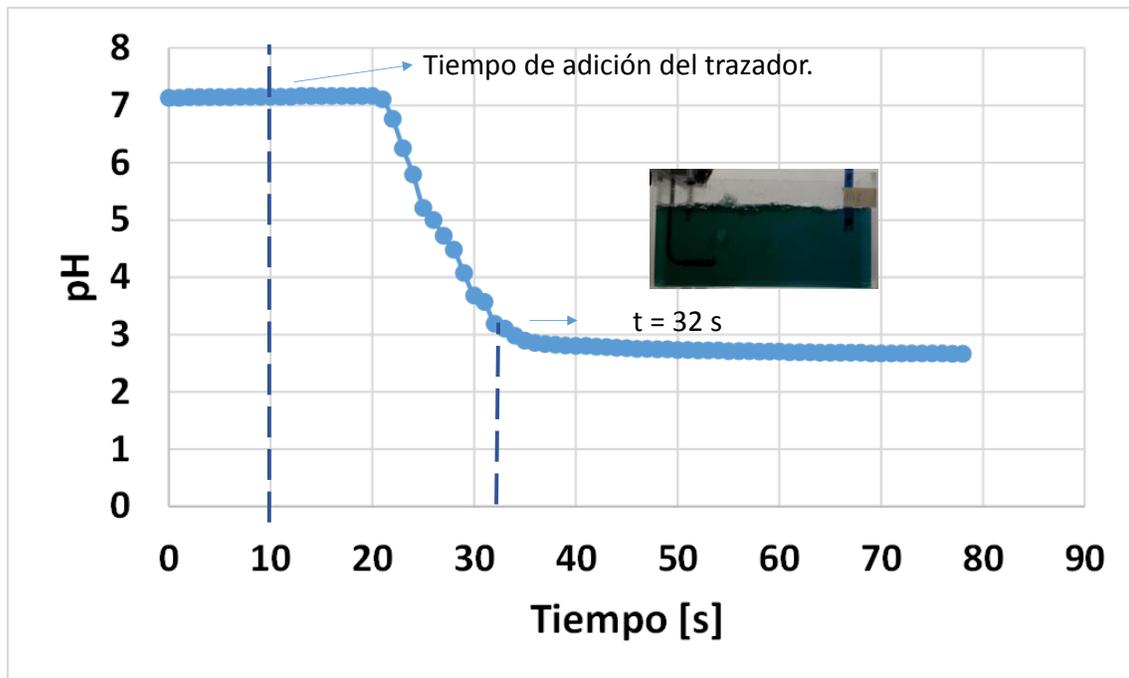


Figura 5.8. Respuesta local del sistema e imagen a los 32 s de iniciada la videograbación. El tiempo local de mezclado fue de 22 s.

El electrodo está posicionado al otro extremo del modelo de donde se realizó la inyección del trazador lo que provoca que el tiempo local de mezclado tenga un valor grande; es por eso que la imagen que muestra el tiempo de mezclado local se asemeja a la del tiempo de mezclado global del sistema.

De una serie de imágenes obtenidas a partir del video se determinaron los valores de  $(R,G,B)$ , de la manera que se describió anteriormente, para una zona justo debajo de la punta del electrodo de pH (ver Figura 5.4). Con ayuda de la curva de calibración se estimó el pH correspondiente y luego se comparó con el valor medido con el electrodo. La evolución de los valores de  $R$ ,  $G$  y  $B$  se grafican en la Figura 5.9; también se grafica el valor resultante de promediar  $R$ ,  $G$  y  $B$ . Se observa que la forma de las curvas de  $G$  y  $B$  es similar a la observada para la evolución del pH medido localmente por el electrodo, mientras que los valores de  $R$  caen rápidamente; esto provoca que la curva promedio de los valores de  $R$ ,  $G$  y  $B$  se desplace por debajo de las curvas de  $G$  y de  $B$ . De la

curva promedio de los valores de  $R$ ,  $G$  y  $B$  se puede estimar un valor del tiempo local de mezclado entre 23 y 28 s (recuérdese que el trazador se adiciona después de transcurridos 10 s). Nótese que cada curva por separado daría distintos valores de tiempo local de mezclado.

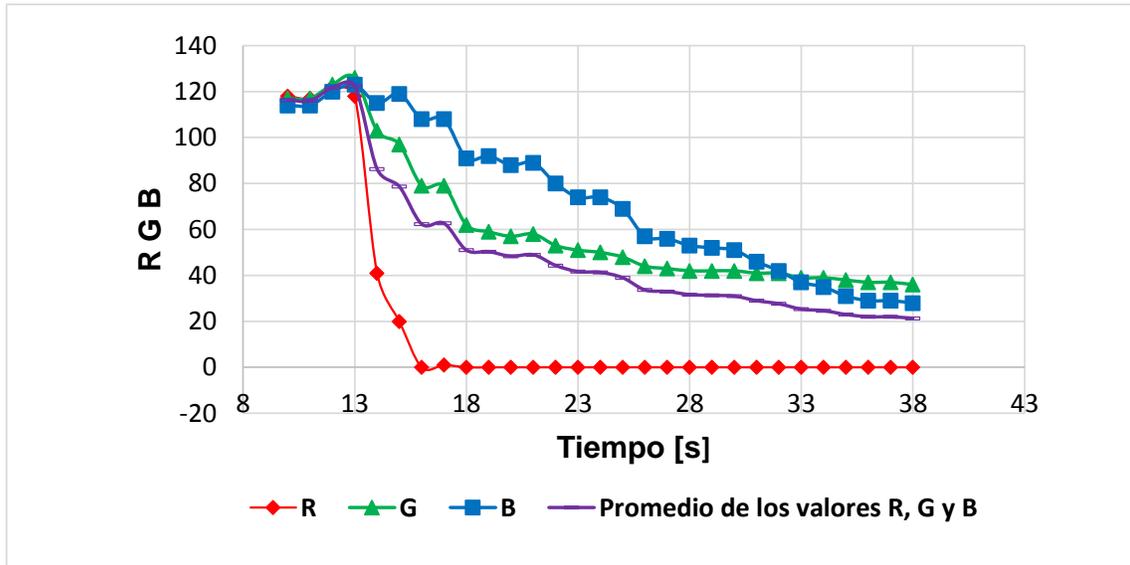


Figura 5.9. Evolución de  $R$ ,  $G$ ,  $B$  y del promedio de los valores de  $R$ ,  $G$  y  $B$  en una zona debajo del electrodo (referirse a la Figura 5.4).

En la Figura 5.10 se grafican los valores medidos con el electrodo de la evolución del pH (curva amarilla) junto con los valores estimados de la evolución de  $R$  (curva roja),  $G$  (curva verde) y  $B$  (curva azul), así como el promedio de los valores de  $R$ ,  $G$  y  $B$  (curva morada).

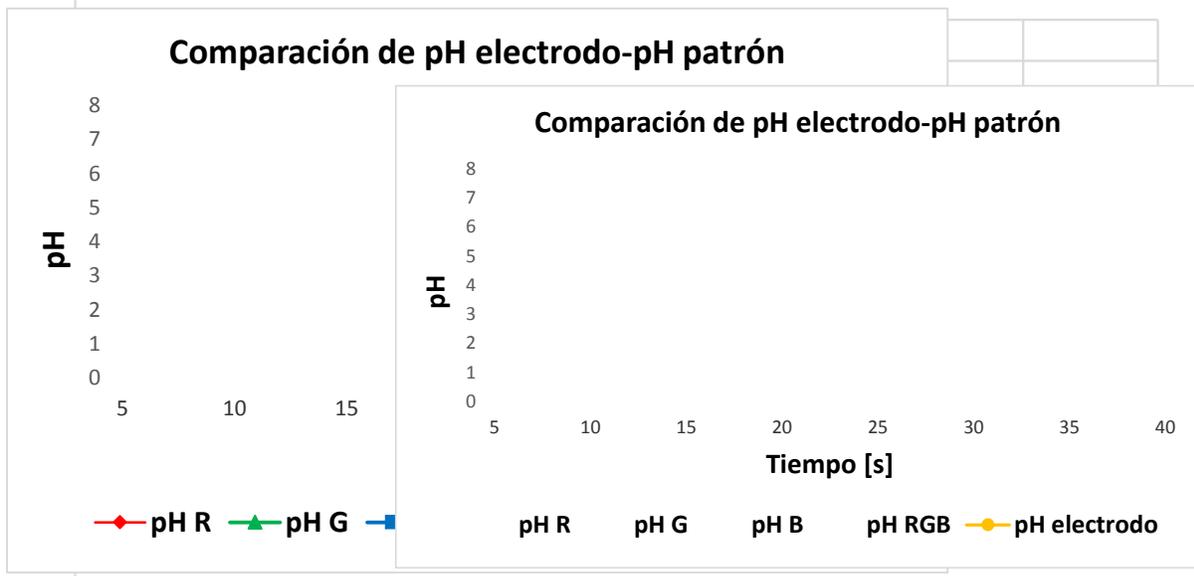


Figura 5.10. Respuesta local del sistema (pH vs. tiempo) medida (línea amarilla) y estimada usando las curvas de evolución de  $R$  (línea roja),  $G$  (línea verde),  $B$  (línea azul) promedio de los valores  $R$ ,  $G$  y  $B$  (línea morada).

Las curvas de evolución de pH medida y estimada (con el promedio de los valores  $R$ ,  $G$  y  $B$ ) son cualitativamente similares, pero están desfasadas en el tiempo. Este desfase se debe a que la posición de las imágenes utilizadas para el análisis corresponde a una zona debajo de la punta del electrodo y no sobre la punta del sensor del mismo, por lo que la respuesta medida se da una vez que el trazador se ha transportado hacia el sensor del electrodo (ubicado a poco menos de 5 mm dentro de la punta del electrodo) mientras que los valores de pH estimados por medio de la lectura de  $RGB$  corresponden a una zona para la cual el colorante aún no se ha transportado hacia el sensor del electrodo, de ahí que el cambio en pendiente en la curva registrada por el electrodo está desfasada (en este caso 8 segundos) con respecto al cambio registrado de pendiente en las curvas de  $R$ ,  $G$ ,  $B$  y promedio de los valores  $R$ ,  $G$  y  $B$ . Este ejercicio permite establecer que la metodología propuesta es válida.

#### 5.4 Mapas de evolución de pH y de $[H^+]$

Para realizar los mapas de pH (y, en consecuencia, de  $[H^+]$ ) de las imágenes extraídas del video se compararon los valores promediados en *PASCAL* de una malla de 350 x 150 pixeles, con subáreas de 20 x10 pixeles, como se muestra en la Figura 5.11. De esta manera se obtienen 48 subáreas de muestreo. La esquina inferior izquierda del área está ubicada en el punto  $x = 0$  pixeles,  $y = 0$  pixeles.



Figura 5.11. Malla para las imágenes extraídas del video.

Se decidió usar esta malla para que no existiera intervención de las sombras o de las orillas del modelo y así la lectura de *RGB* fuera solo debido a la trayectoria del trazador.

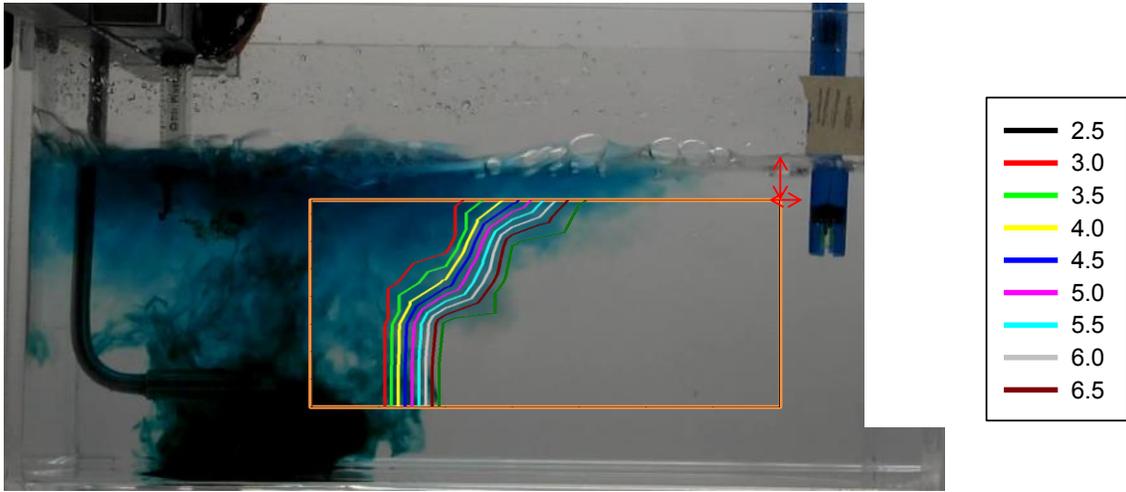
Al procesar las imágenes correspondientes a diferentes tiempos (Figura 4.3), los datos se almacenaron en un archivo ASCII para proceder de manera similar al caso anterior, usando un programa en *dev-PASCAL* para obtener valores

promedio para cada uno de los 48 puntos de muestreo. Con los datos de *RGB* promedio  $[(R+G+B)/3]$ , para cada punto de muestreo se realizó una comparación con la curva patrón para interpolar valores de pH. Si el valor de *RGB* promedio de la imagen es el valor exacto del patrón o el más cercano, se le asigna ese valor de pH.

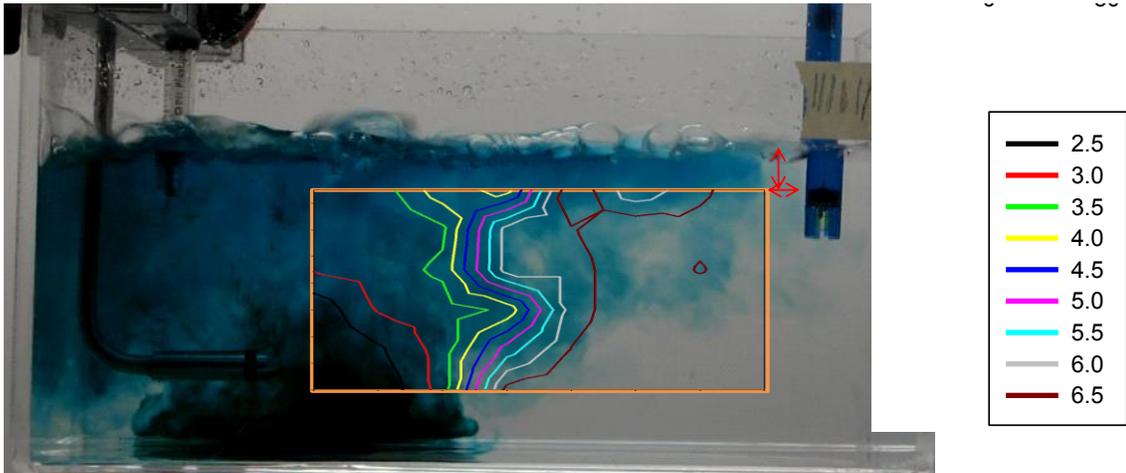
El conjunto de datos obtenidos se utilizó para realizar un gráfico de contorno, que representa a un mapa de pH de cada área de las imágenes extraídas del video. En la Figura 5.12 se muestran 5 mapas resultantes de este procesamiento de datos (para 12, 13, 14, 16 y 18 s, con respecto al inicio de la videograbación); en cada caso se ha sobrepuesto la imagen correspondiente extraída del video.

El mapa a los 12 segundos presenta una línea que marca el frente de avance del trazador lo cual puede corroborarse con la imagen superpuesta. Esto indica que la lectura de *RGB* identifica correctamente donde hay trazador y donde no.

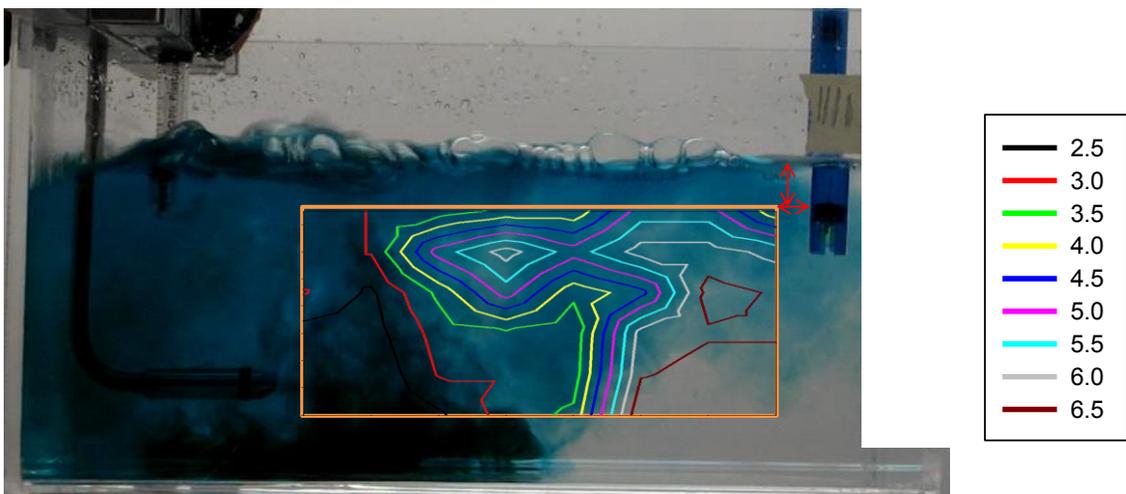
Para cuando ya han transcurrido 13 segundos se pueden identificar contornos cada vez más dispersos o separados, puesto que el mezclado va ocurriendo; se puede notar que hay “huecos” que no presentan un contorno, es decir, hay lugares con colorante que no son señalados por un contorno; esto se puede explicar porque el mallado en el que se hicieron las lecturas de *RGB* (ver Figura 5.11) no es lo suficientemente fino como para evidenciar cada una de las posiciones en las que ya se encuentra el trazador.



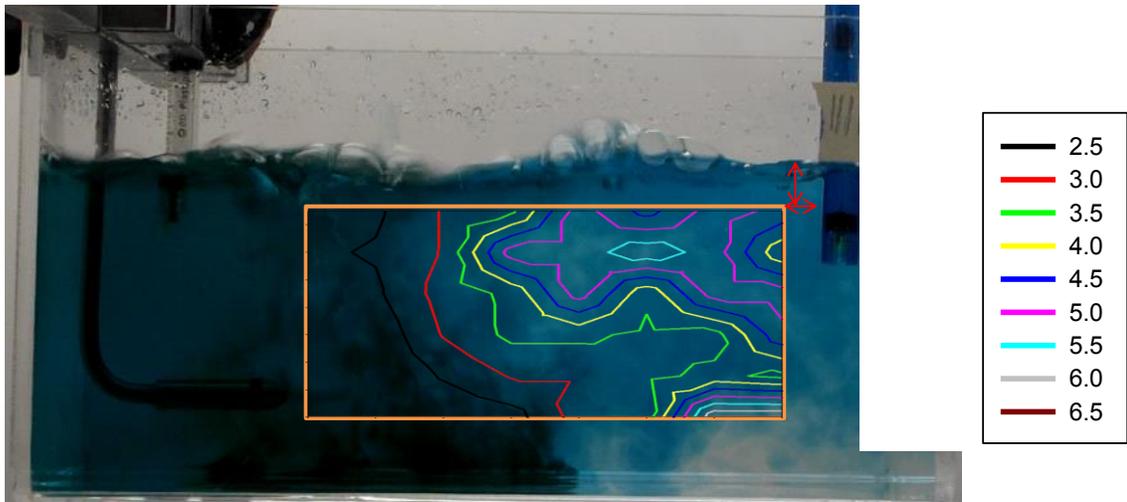
(a)



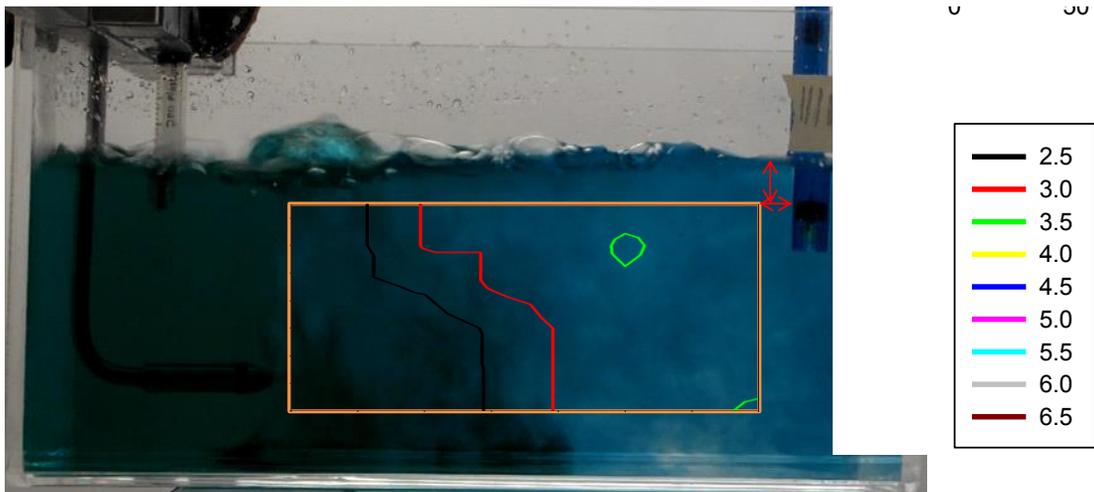
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.12.- Mapa de la evolución del pH: (a) 12, (b) 13, (c) 14, (d) 16 y (e) 18 segundos.

A los 14 segundos el frente colorido ya se encuentra en un punto donde abarca toda el área leída y los contornos van tomando una ruta de mezclado que evidencia el patrón de flujo del trazador.

A los 16 segundos se tiene un área con pH de entre 5.5 y 6 que está por desaparecer en la parte inferior derecha del área, para dar paso a un pH más ácido. Ya no se observa el contorno de pH = 6.5.

A los 18 segundos, debido a que el sistema se ha mezclado bastante, es evidente que hay una disminución del pH en toda el área muestreada. Los contornos de acidez están en un rango de entre 2.5 y 3.5 unidades de pH; recuérdese que, de los resultados del video, se sabe que el mezclado se completará más o menos a los 35 segundos desde el comienzo de la videograbación.

La relación entre pH y  $[H^+]$  es:  $pH = -\log [H^+]$ , con la que se pueden obtener los mapas equivalentes de la distribución de la acidez pero expresada en  $[H^+]$ . Un ejemplo del mapa de  $[H^+]$  a 12 s se aprecia en la Figura 5.13; los contornos están graficados en escala logarítmica debido a que, si se grafican en escala natural, casi no se aprecian diferencias entre ellos. Como es de esperarse, el mapa es similar al de la Figura 512 (a).

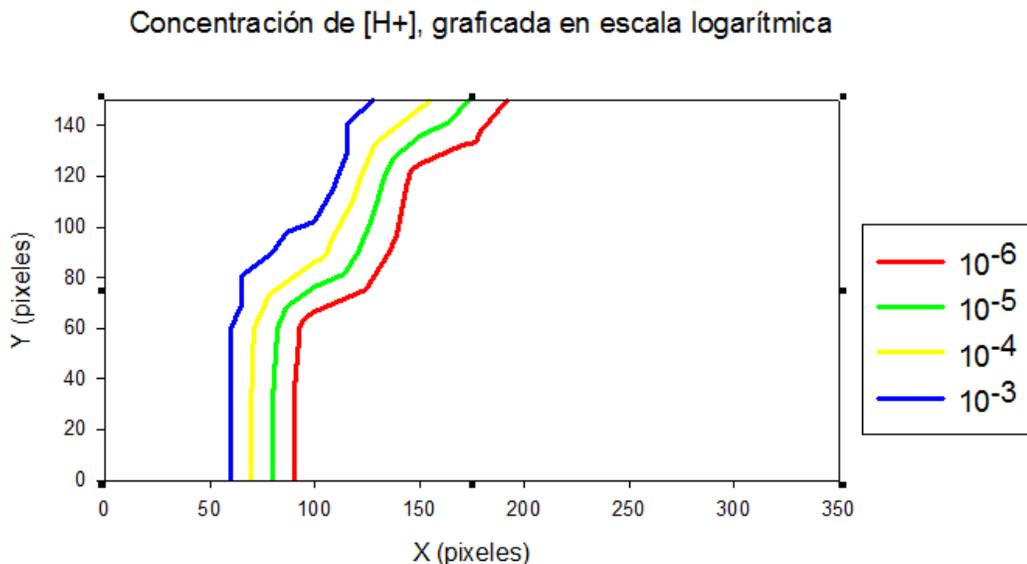


Figura 13. Mapa de concentración de  $[H^+]$  para la imagen a 12 segundos; la escala de contornos es logarítmica.

## 6 Conclusiones

Para generar mapas cuantitativos de la evolución de  $[H^+]$  (o, equivalentemente, de pH) en un modelo físico de manera no intrusiva se desarrolló una metodología novedosa, basada en análisis de imágenes en combinación con un trazador ácido y colorido. Como ejemplo se utilizó un modelo físico *ad hoc* agua-aire, con inyección lateral.

Los valores de  $R$ ,  $G$  y  $B$  promediados aritméticamente, en combinación con una curva patrón pH- $RGB$ , dan como resultado mapas que caracterizan cuantitativamente el avance y la distribución del trazador colorido, que es sensible al cambio de acidez; por ello pueden sobreponerse los mapas de pH a las imágenes extraídas del video dando una buena correlación, lo que valida la metodología propuesta.

Con los resultados obtenidos se concluye que la técnica propuesta puede contribuir al estudio de la dinámica de un fluido en un modelo físico sin recurrir a técnicas costosas (como  $PIV$ ) o que solo muestrean volúmenes a la salida de un modelo físico o bien tienen que ser intrusivas (como colorimetría).

## 7 Recomendaciones y trabajo a futuro

- Desarrollar la interpolación de *RGB* promedio a pH en *dev-PASCAL*.
- Interpolar en el espacio *RGB*.
- Indagar sobre el efecto de la cantidad de colorante y la concentración de ácido en el trazador inicial sobre los resultados.
- Estudiar si el trazador sufre cambios si se almacena por mucho tiempo.
- Caracterizar la sensibilidad del colorante frente a soluciones ácidas, ya que su cambio de color al diluirse puede deberse a que la anilina<sup>5</sup> utilizada (o alguno de sus componentes, dado que es una mezcla) sea un indicador de pH.

---

<sup>5</sup> En el Apéndice A se muestra la ficha técnica de la anilina.

## 8 Referencias bibliográficas

- [1] J.K. Brimacombe. "The Extractive Metallurgist in an Emerging World of Materials". *Metallurgical Transactions B*, vol. 20B, 1989, pp. 291-313.
- [2] J. Szekely, J.W. Evans y J.K. Brimacombe. *The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operations*. John Wiley & Sons, New York, 1988
- [3] R.I.L. Guthrie. *Engineering in Process Metallurgy*. 1ª re-impresión, Oxford Science Publications, Oxford, 1992.
- [4] P.E.J. Vermeulen y G. Th. Visser. "Determination of similarity criteria for wind-tunnel model testing of wind flow patterns close to building facades", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1980, vol. 6, no. 3-4, pp. 243-259.
- [5]. "Side-blown copper-nickel matte converter". *Encyclopædia Britannica Online*. <http://global.britannica.com/EBchecked/media/113914/A-side-blown-copper-nickel-matte-converter>. Consultada en enero de 2015.
- [6] J.C. Contreras Guzmán, B. Hernández Morales y A. Nájera Bastida. "Dinámica de flujo en un modelo físico de un reactor metalúrgico con inyección lateral". *Memorias del XXI Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva "Innovación y Retos en la Metalurgia Extractiva"*, UAM, 2012. Pp. 322-334. ISBN: 978-607-477-707-9.
- [7] A. Miranda Martínez. "Caracterización del campo de velocidad y régimen de flujo en un modelo físico de inyección de gas mediante una tobera lateral sumergida". *Reporte de Estancia Corta de Investigación, Facultad de Química, UNAM*, agosto de 2013.
- [8]. "Agitación mecánica", *mEQ La Revista de Química Útil*, Edición 17, marzo de 2011, pp. 6-8.

Descarga desde <http://issuu.com/meqlarevistadequimicautil/docs/meq17>  
(consultada en enero de 2015)

[9] J. Szekely. Fenómenos de Flujo de Fluidos en Procesos Metalurgicos. LIMUSA, 1988.

[10]. C. Kloppers y T. Fedotova, "Primary de-Oxidation of basic oxygen furnace Steel by means of carbon", The Journal of the South African of Mining and Metallurgy, October 2001, pp 321-328.

[11]. W. G. Davenport y M. King. **Extractive metallurgy of Copper**. Pergamon Press. Fourth edition. Chapter 9.

[12]. G. Pereyra, M. D. Ayciriex, C. Macchi y A. Somoza, "Estudio de la porosidad en una aleación de base Al-Si-Mg", Congreso SAM/CONAMET 2007, San Nicolas, septiembre 2007, pp 1830-1835.

[13]. F. Botero. "Hornos de inducción: producción limpia y eficiente". [http://www.metalactual.com/revista/20/maquinaria\\_hornos.pdf](http://www.metalactual.com/revista/20/maquinaria_hornos.pdf). Consultada en diciembre de 2014.

[14]. X. Dong, G. Mi, L. He y P. Li, "3D simulation of plane induction electromagnetic pump for the supply of liquid Al-Si alloys during casting". *Journal of Materials Processing Tech.*, Volume 213, issue 8 (August, 2013), p. 1426-1432.

[15]. J. Sakane, B. Q. Li y J.W. Evans. "Mathematical Modeling of Meniscus Profile and Melt Flow in Electromagnetic Casters". Metallurgical Transactions. Volumen 19D, 1989.

[16]. B. Hernandez-Morales y A. Mitchell. "Review of Mathematical Models of Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer in the Electroslag Remelting Process". Ironmaking and Steelmaking (UK). Vol. 26, no. 6, pp. 423-438, 1999.

[17]. S.D. Limpany y J.W. Evans. "The Hall-Heroult Cell Some Design Alternatives Examined by a Mathematical Model". Metallurgical Transactions. Vol. 14B, 1987.

[18]. J.B. Hernández M., A. Ingalls C. y J.A. Barrera G. Guiones de trabajo experimental de Modelado Físico de Procesos Metalúrgicos. UNAM. Facultad de Química, 2013.

[19]. M.E. Mandrini, Miriam S. Estela y Luis P.Thomas. "Procesamiento de imágenes en diagnósticas usadas en dinámica de fluidos basadas en agregado de colorantes". Memorias de IIX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2003). Universidad Nacional de la Plata, 2003, pp. 835-845.

[20]. L.P. Thomas, B. M. Marino y M.S. Estela. "Visualización de flujos, determinación de la velocidad del movimiento de variables físicas a partir de la evolución de líneas de nivel". Anales AFA, vol. 18, 2006, pp. 138-143.

[21]. L.P. Thomas, B. M. Marino y M. Mandrini. "Medición de la concentración de trazadores pasivos: aplicación a las corrientes de gravedad". Memorias de la "Reunión sobre recientes avances en física de fluidos y sus aplicaciones", Universidad Nacional del Centro, 2003.

[22] B.G. Thomas, R.O'Malley, T.Shi, Ya Meng, D. Creech yD.Stone. "Validation of Fluid Flow and Solidification Simulation of a Continuous Thin-Slab Caster". MCWASP IX, Germany, 2000, pp. 769-776.

[23] S. Srigrarom y A.K.G. Koh. "Flow field of self-excited rotationally oscillating equilateral triangular cylinder". Journal of Fluids and Structures, 24 (2008),pp. 750-755.

[24].<http://bloodshed.net/dev/pascal.html>. Consultada en diciembre de 2014.

## Apéndice A



### HOJA DE SEGURIDAD

Descripción:	COLOR AZUL # 1710	Código: 7007
<b>SECCIÓN I. IDENTIFICACIÓN DEL FABRICANTE Y DE LA SUSTANCIA.</b>		
Identificación:	Color Azul # 1710	
Modo de uso:	Aditivo para alimentos	
Nombre del fabricante:	Aceites y Esencias S.A.	
Teléfonos:	52 54 70 55 y 52 55 15 81	
Domicilio:	fax 52 50 30 62 Lago Victoria No 52 Col. Granada 11520 México D.F.	
<b>SECCIÓN II. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES.</b>		
Nombre Comercial:	Color Azul # 1710	
Composición:	N/A	
Número de CAS:	No aplica ya que es una mezcla	
<b>SECCIÓN III. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS.</b>		
Contacto con: Ojos:	<b>Efectos:</b> Posible irritación, por la acción mecánica de las partículas de polvo.	
Piel:	Ligera pigmentación	
Ingestión:	Sabor desagradable y problemas gástricos.	
Inhalación:	Ligeras molestias en el tracto respiratorio.	
<b>SECCIÓN IV. PRIMEROS AUXILIOS.</b>		
Contacto con: Ojos:	<b>Actividad:</b> Lavar perfectamente con agua tibia por un tiempo estimado de 15 min. Y dar atención médica	
Ingestión:	No provoque vómito date atención médica.	
Inhalación:	Trasladar a la persona a un área ventilada y dar atención médica.	
<i>Nota: En todos los casos solicitar ayuda médica si persiste la molestia.</i>		
<b>SECCIÓN V. COMBATE DE INCENDIOS.</b>		
Medios de Extinción:	Utilizar polvos químicos secos, CO2, espuma y agua.	
Protección Especial:	Utilizar equipo de respiración autónoma y ropa protectora.	
Productos de la Combustión:	Óxidos de carbono, nitrógeno y azufre.	
<b>SECCIÓN VI. LIBERACIONES ACCIDENTALES (Fugas o Derrames).</b>		
General:	Lavar con agua en abundancia. Usar mascarilla para polvos finos.	
Disposición:	Use un traje tyvet para evitar que su ropa se caliente. Desechar en un lugar destinado para compuestos químicos cumpliendo a las leyes estatales y federales.	

Descripción:	COLOR AZUL # 1710	Código: 7007
--------------	-------------------	--------------

<b>SECCIÓN VII. MANEJO Y ALMACENAMIENTO.</b>	
Contenedor:	Mantener el envase perfectamente cerrado.
Área:	Fresco, seco, alejada de fuentes de calor y electricidad.

<b>SECCIÓN VIII. CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL.</b>	
Protección de:	<b>Equipo de protección personal:</b>
Ojos:	Se sugiere el uso de lentes de seguridad.
Piel:	Se recomienda restringir el contacto con el producto lo mas posible (uso de guantes de plástico o de goma).
Vías respiratorias:	Usar mascarilla recomendada para polvos finos, respirador OSHA/MSHA
Ventilación:	La buena ventilación o un colector de polvos, puede ser útil pero no necesario.
<b>Nota: Es recomendable seguir las Buenas Prácticas de Manufactura.</b>	

<b>SECCIÓN IX. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.</b>	
Concentración de Color:	20.23 % Mínimo
Humedad a 135 ° C. Cloruros y Sulfatos de Sodio:	79.77 % Máximo
Insolubles en Agua:	0.2 % Máximo.
Plomo:	2 ppm Máximo
Antiséptico:	3 ppm Máximo
Metales Pesados:	N/A
Extractos Eléctros:	N/A

<b>SECCIÓN X. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD.</b>	
Estabilidad:	Es estable
Condiciones y Materiales a evitar:	El contacto con los agentes oxidantes y reductores fuertes.
Reacción de Polimerización:	No ocurre

<b>SECCIÓN XI. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA.</b>	
Por contener en su composición Col. Amarillo # 5 se considera una sustancia sensible.	

<b>SECCIÓN XII. INFORMACIÓN ECOLÓGICA.</b>	
N/D	

<b>SECCIÓN XIII. CONSIDERACIONES SOBRE LA DISPOSICIÓN.</b>	
Desechar en un lugar destinado para compuestos químicos cumpliendo a las leyes estatales y federales.	

Descripción:	COLOR AZUL # 1710	Código: 7007
--------------	-------------------	--------------

<b>SECCIÓN XIV. INFORMACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE.</b>	
Contenedores:	No abra los recipientes; este producto no es tóxico según las investigaciones realizadas, evite el maltrato del recipiente.

<b>SECCIÓN XV. INFORMACIÓN SOBRE REGLAMENTACIÓN.</b>	
N/D	

<b>SECCIÓN XVI. OTRA INFORMACIÓN.</b>										
Código NFPA	<table border="1"> <tr> <td>SALUD</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>INFLAMABILIDAD</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>REACTIVIDAD</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>OTROS</td> <td></td> </tr> </table>		SALUD	0	INFLAMABILIDAD	1	REACTIVIDAD	0	OTROS	
SALUD	0									
INFLAMABILIDAD	1									
REACTIVIDAD	0									
OTROS										
0 MÍNIMO										
1 LIGERO										
2 MODERADO										
3 ALTO										
4 EXTREMO										
<p>NOTA: La información contenida en este documento es una guía de seguridad únicamente, por lo que no constituye una especificación. La información es precisa de acuerdo a nuestros conocimientos, sin embargo, está fuera de nuestra competencia las condiciones de manejo por el usuario intermediario o final, por lo que no garantizamos ningún resultado, ni asumimos responsabilidad alguna por los daños incurridos en el uso de este material. Es responsabilidad del usuario cumplir con las normas y regulaciones aplicables al producto.</p>										