

ESTUDIO DE LA OXIDACIÓN Y REDUCCIÓN DE LOS METALES: EL
REVELADO FOTOGRÁFICO Y LAS CONDICIONES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE
LAS SUSTANCIAS.

EDWARD CAMILO MURCIA AVILA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES
BOGOTÁ D.C.
2025

ESTUDIO DE LA OXIDACIÓN Y REDUCCIÓN DE LOS METALES: EL
REVELADO FOTOGRÁFICO Y LAS CONDICIONES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE
LAS SUSTANCIAS.

EDWARD CAMILO MURCIA AVILA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE MAGISTER EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES.

SANDRA SANDOVAL OSORIO
JOSÉ FRANCISCO MALAGÓN SÁNCHEZ
YESSICA VIVIANA BARRAGÁN ORJUELA

GRUPO DE INVESTIGACIÓN: ESTUDIOS HISTÓRICO CRÍTICOS DE LA
ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS EHC^{EC}.

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES
BOGOTÁ D.C.
2025

“Para todos los efectos declaro que el presente trabajo es original y de mi autoría, para los casos en los que se han requerido trabajos de otros autores y otras investigaciones, se han dado los correspondientes créditos”

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mi esposa Daniela Nieves, por estar apoyándome durante todo el proceso, por permitirme quitar tiempo de estar juntos para mi formación personal.

A mi hija Guadalupe (mi Lupita), por crecer junto a mí, acompañarme todas las noches mientras escribía y escribir a mi lado, dándome ánimo para seguir con el proceso.

A mis profesores de la maestría en docencia en ciencias naturales, que gracias a sus seminarios cambiaron mi forma de ver la ciencia. Especialmente a los profesores Sandra Sandoval y Steiner Valencia, por cultivar en mí una actitud crítica, quitarme la venda de los ojos y formar un mejor maestro.

A mis asesores de tesis Sandra Sandoval, Francisco Malagón y Yessica Barragán quienes, gracias a sus correcciones, sus puntos de vista y sus experiencias permitieron darle forma a este escrito.

A Dios, a mi familia, a la Universidad Pedagógica Nacional y a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por formar a una mejor persona. Sin el apoyo de ustedes seguramente el maestro que ahora soy no estaría presente.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. DIFICULTADES EN LA ENSEÑANZA DE LA ÓXIDO - REDUCCIÓN DESDE LA EXPERIENCIA	11
2. PROPÓSITOS Y PROYECCIONES DE LA INVESTIGACIÓN	13
3. EL PAPEL DE LA EXPERIMENTACIÓN, EL EXPERIMENTO Y LAS ACTIVIDADES EXPERIMENTALES EN EL AULA DE CIENCIAS NATURALES	14
3.1. El experimento como construcción de experiencia y comprensión	15
3.2. La actividad experimental en el aula, el paso de la verificación a la construcción de fenomenologías	16
3.3. El papel de la experimentación en la formación de los docentes y en la enseñanza de las ciencias naturales	17
3.4. Actividades experimentales como medio de formalización en el aula	18
3.5. Implicaciones pedagógicas y epistemológicas de las actividades experimentales	19
4. INVESTIGACIONES FOTOQUÍMICAS DE BUNSEN Y ROSCOE.	21
4.1. Investigaciones fotoquímicas: medición de la acción química de la luz.	21
5. INVESTIGACIONES FOTOQUÍMICAS: FENÓMENO DE INDUCCIÓN FOTOQUÍMICA	31
6. INVESTIGACIONES FOTOQUÍMICAS: ÓPTICA Y QUÍMICA DE LOS RAYOS QUÍMICOS	36
6.1. Experimentos con diferentes tipos de vidrio	36
6.2. Experimentos con el vidrio Crown	39
6.3. Evaluación del agua como posible interferente	42
6.4. Experimentación con densidades	44
6.5. Experimentación con gases como interferentes	45
7. DE LA CALCINACIÓN A LA LUZ: ALGUNAS VISIONES DE LA OXIDACIÓN Y LA REDUCCIÓN	57
7.1. La ruptura y el paso del flogisto al oxígeno	57
7.2. Experimentos más relevantes que desarrolló Lavoisier	58
7.3. La oxidación como proceso de combinación	60
7.4. La revivificación de los metales: el origen del término reducción actual	61
7.5. La luz como un agente químico capaz de romper afinidades químicas	62
8. LOS ATRIBUTOS DEL COLOR Y LA RELACIÓN ENTRE LA MATERIA Y LA LUZ	64
8.1. El color como signo de transformación	66
8.2. La luz como agente experimental	67
9. LA PURIFICACIÓN DE LOS METALES EN DE RE METALICA Y SU RELACIÓN CON LA REVIVIFICACIÓN DE LAVOISIER	68
9.1. Los experimentos metalúrgicos de Agrícola	69
9.2. El fuego como agente de separación y purificación	71
9.3. Una continuidad experimental, del fuego a la luz	72

10. DEL FUEGO, EL CALOR, LA LUZ Y LOS RAYOS QUÍMICOS A LA FOTOGRAFÍA: UNA RUTA METODOLÓGICA CON PAPEL SENSIBLE A LA LUZ.	73
10.1 Actividad preliminar	77
10.2 Actividad 1 (Efectos) Efectos de la luz sobre el papel fotográfico	79
10.3 Actividad 2 (Efectos) Efecto de los tiempos de exposición del papel fotográfico a la fuente de luz	82
10.4 Actividad 3 (Discriminación de los efectos) Cambios en las distancias del papel fotográfico a la fuente de luz	84
10.5 Actividad 4 (Discriminación de los efectos) Experimentación con luces de diferentes colores	85
10.6 Actividad 5 (Discriminación de los efectos) Experimentación con diferentes colores de luz y sus diferentes intensidades	88
10.7 Actividad 6 (Relación con los cambios químicos) La fotografía con la cámara estenopeica	92
11. LA LUZ COMO CAMINO DE LA ENSEÑANZA Y LA COMPRENSIÓN.	93
BIBLIOGRAFÍA	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Experimentos de proporcionalidad entre cloro y el hidrógeno obtenido por electrólisis.	23
Tabla 2. Experimentos de cuantificación de los rayos químicos en la reacción.	39
Tabla 3. Resultados de los experimentos sobre la interacción del agua con los rayos químicos.	42
Tabla 4. Resultados de los experimentos sobre las diferentes densidades de la tinta roja.	44
Tabla 5. Resultados de los experimentos usando el gas cloro como interferente.	46
Tabla 6. Producción de ácido clorhídrico usando diferentes proporciones de gas cloro como interferente.	48
Tabla 7. Rayos químicos utilizados para la producción de ácido clorhídrico en un día soleado y en un día nublado.	50
Tabla 8. Comparación en la producción de ácido usando sol de la mañana y sol de la tarde.	51
Tabla 9. Resumen de las conclusiones a las que llegan Bunsen y Roscoe durante sus experimentos.	53
Tabla 10. Comparación entre la teoría del flogisto y las nuevas afirmaciones de Lavoisier.	58
Tabla 11. Experimentos principales de Lavoisier sobre la oxidación de la reducción (revivificación)	59
Tabla 12. Grados de oxigenación de los metales según la clasificación realizada por Lavoisier.	60
Tabla 13. Paralelo entre los textos de Bunsen y Roscoe y las observaciones de Lavoisier.	62
Tabla 14. Experimentos de Boyle sobre los cambios de color de las sustancias.	65
Tabla 15. Procesos metalúrgicos que se describen en De Re Metallica de Agrícola.	69
Tabla 16. Comparación conceptual entre Agrícola, Lavoisier y Boyle.	71
Tabla 17. Experimentos propuestos para la comprensión de la dinámica de la luz en el papel fotográfico.	73
Tabla 18. Resultados de la imagen revelada del papel fotográfico cuando se expuso a luz blanca, pero se variaron los tiempos de exposición.	81
Tabla 19. Resultados de los trozos de papel fotográfico afectados por la luz a diferentes distancias.	83
Tabla 20. Resultados del revelado de los trozos de papel cuando se hicieron interactuar con diferentes colores de luz.	86
Tabla 21. Resultados del revelado fotográfico evaluando diferentes intensidades de luz blanca.	87
Tabla 22. Resultados del revelado fotográfico evaluando diferentes intensidades de luz verde.	88
Tabla 23. Resultados del revelado fotográfico evaluando diferentes intensidades de luz roja.	89
Tabla 24. Resultados del revelado fotográfico evaluando diferentes intensidades de luz azul.	90

INDICE DE IMAGENES

Imagen 1. Montaje utilizado por Bunsen y Roscoe para calcular la cantidad de gas cloro y de gas hidrógeno producido en la electrólisis del ácido clorhídrico.	22
Imagen 2. Montaje experimental utilizado por Bunsen y Roscoe para la medición de la acción química de la luz.	24
Imagen 3. Reacción de los gases hidrógeno y cloro para la formación del ácido clorhídrico sin interferentes	36
Imagen 4. Reacción de los gases hidrógeno y cloro para la formación del ácido clorhídrico con interferentes.	37
Imagen 5. Esquema experimental usado por Lavoisier para explicar la oxidación y la reducción.	61
Imagen 6. Luxómetro usado como instrumento de medición de la cantidad de luz en los experimentos.	77
Imagen 7. Papel fotográfico revelado sin contacto con la luz y valor de intensidad de luz detectado por el luxómetro en este experimento.	79
Imagen 8. Papel fotográfico revelado que si tuvo contacto con la luz y valor de intensidad de luz detectado por el luxómetro en este experimento.	79
Imagen 9. Papel fotográfico revelado que tiene una parte cubierta con cinta y otra parte expuesta a la luz y valor de intensidad de la luz detectado por el luxómetro.	80
Imagen 10. Papel fotográfico revelado cuando la fuente de energía era el calor y no la luz, y valor de la intensidad de luz usada durante el procedimiento.	81
Imagen 11. Fuente de luz utilizada durante los experimentos.	85

INTRODUCCIÓN

La comprensión de la oxidación y la reducción plantea desafíos conceptuales que, desde la experiencia docente, motivan a revisar profundamente las formas en que se comprende, se interpreta y se explica la transformación de las sustancias. Esta investigación surge como un ejercicio de reflexión del docente, orientado a reencontrarse con los fundamentos fenomenológicos e históricos de estos procesos y a fortalecer la comprensión del vínculo entre la luz, la materia y las transformaciones químicas.

Con este propósito, el trabajo retoma episodios y prácticas experimentales que marcaron el desarrollo de la química —desde Boyle y Lavoisier hasta los estudios fotoquímicos de Bunsen y Roscoe— para reconstruir con intencionalidad las condiciones que hicieron posible comprender la oxidación y la reducción. La lectura detenida de estos referentes permite al profesor-investigador aproximarse nuevamente a los fenómenos desde la experiencia sensible y desde una mirada histórica que destaca el papel de la observación, el color, la acción química de la luz y la evolución de las ideas científicas.

En esta ruta, la cámara estenopeica se convierte en un instrumento central que ofrece al docente un espacio experimental para observar de manera directa los efectos de la luz sobre el papel fotográfico y las transformaciones asociadas a los haluros de plata. Esta experiencia favorece la comprensión del fenómeno desde la materialidad misma del proceso fotoquímico, permitiendo dialogar con el experimento, reconocer variables, distinguir efectos y construir explicaciones a partir de lo que el fenómeno muestra.

A partir de estas experiencias, se diseña una serie de actividades experimentales que fortalecen la reflexión frente a los procesos de óxido - reducción, atendiendo a los vínculos entre luz, afinidades químicas, color y transformación de las sustancias. Este recorrido experimental e interpretativo contribuye a profundizar en la comprensión docente de la oxidación y la reducción desde una perspectiva histórica, fenomenológica y epistemológica.

El documento inicia comentando las dificultades que como docente se presentan en el aula de clase a la hora de hablar de reacciones de óxido - reducción, que desembocan en inicio del proceso investigativo. Luego se expresa la idea del experimento y más que todo del experimento dentro del aula de clase y su importancia a la hora de facilitar el proceso del conocimiento.

Una vez compartido el asunto del experimento, se desarrolla una reconstrucción histórica y epistemológica de los procesos que permiten comprender la luz y las transformaciones químicas desde Bunsen y Roscoe en primer lugar, luego desde las visiones de Lavoisier, pasando por las ideas de Boyle, para terminar con asuntos relevantes para Agrícola.

Posteriormente se describen actividades desarrolladas mediante la construcción de una ruta metodológica en donde se incluyen experiencias sobre la transformación de las sustancias, siendo la luz es el agente fundamental para que ocurra este proceso, incluida la experiencia con la cámara estenopeica, analizando los aportes reflexivos por parte del docente. Finalmente, se integran las consideraciones teóricas y experimentales que consolidan la comprensión alcanzada y las proyecciones del trabajo en el marco de la enseñanza de la química. Cabe resaltar que los títulos y subtítulos tienen sus nombres específicos teniendo en cuenta el tema central a trabajar en cada uno de ellos, por lo que se dejó a un lado las designaciones dadas comúnmente como objetivos, conclusiones, etc, pero considerando que en todos estos aspectos se mencionan en el trabajo pero bajo otras denominaciones.

1. DIFICULTADES EN LA ENSEÑANZA DE LA ÓXIDO - REDUCCIÓN DESDE LA EXPERIENCIA

Dentro de mi experiencia en el aula de clase cuando quiero hablar de fenómenos como el óxido reducción, no encuentro una forma diferente de hacerlo sin traer a colación la ganancia y pérdida de electrones. Mis estudiantes, en la mayoría de los casos, también bajo sus experiencias anteriores, hacen referencia a una ganancia y pérdida de electrones cuando se habla de este tipo de reacciones químicas.

Con el objetivo de tratar de explicar este tipo de reacciones y hacerlas un poco más cercanas a los estudiantes, alejándome de las explicaciones en los tableros, se propone el uso de experimentos en los que las reacciones de óxido - reducción sean el centro de atención. Teniendo en cuenta lo anterior, se desea ejecutar una propuesta de aula en la que después de un análisis histórico se diseñen actividades que al final sinteticen todos los análisis en la construcción de una cámara estenopeica. El diseño de la cámara estenopeica es importante ya que el uso del revelado fotográfico, según Stroebel (2000), convierte los haluros de plata ya reducidos parcialmente de la emulsión expuestos a la luz en plata metálica negra, constituyendo la imagen latente. Si observamos los procesos de transformación de sustancias que se llevan en el revelado, podemos notar que, al convertir los haluros de plata en plata metálica, se está generando una reducción y formación del metal (la plata) a su estado puro.

La idea con la implementación experimental para dar explicación a los procesos de óxido - reducción, es hacer un recorrido desde el origen de la incorporación de los conceptos de oxidación o reducción, que surgieron como el inicio, para considerar después a los procesos matemáticos de la pérdida y ganancia de electrones de los que hablamos en la actualidad. Como se puede ver, la pretensión no será reemplazar la ganancia y pérdida de electrones, sino entenderla desde sus orígenes. En este sentido, lo que se pretende será hacer un recorrido histórico que me haga entender la epistemología de los conceptos tratados y de esta manera poder involucrar estas nuevas formas de comprensión en las explicaciones del aula de clase.

Como se mencionó anteriormente la reacción que ocurre detrás del revelado fotográfico es una reacción química en la que los haluros de plata (uno de los compuestos del cual está cubierto el papel fotográfico) al hacer contacto con la luz se reduce a plata metálica (entre otros subproductos) y luego en el proceso de revelado fotográfico continua la reducción del haluro para

poder observar la fotografía tomada por la cámara. Es importante tener en cuenta que lo que se quiere tratar son las reacciones de óxido - reducción y esta puede ser una situación que favorece la generación de preguntas en el estudiante que me permitan ampliar las experiencias de los estudiantes y poder llegar a formalismos que hagan parte de la actividad experimental.

Esta reacción de reducción de los haluros de plata en el proceso de revelado fotográfico hace que retomemos las clases de química en las que se explican las reacciones de óxido - reducción, en donde los electrones toman un papel central a la hora de darle sentido a la transformación de las sustancias que se está llevando a cabo. Tanto en los libros como en las explicaciones que se encuentran en las diferentes fuentes, los electrones son un elemento clave a la hora de hablar de este tipo de reacciones, pero en el aula, hablar de electrones se convierte en un problema aparte. Decir que se genera un problema al hablar de electrones, responde a lo complejo que es entender este concepto.

En mi experiencia de aula cuando se menciona la palabra electrón se genera ya una no comprensión de los fenómenos que incluyen a esta especie química. Ahora bien, si el propio término de electrón es un concepto que no tiene algún significado explicativo para los estudiantes, cuando se les mencione que las reacciones de óxido - reducción se explican por medio de la ganancia o pérdida de electrones, la forma de entender este fenómeno será para este caso mucho más complicada. No es solo un asunto de no comprender cuál es la diferencia o significado de las palabras, sino además que de esas palabras no hay experiencia formada, como nos suele suceder con los conceptos químicos en la escuela y es que por una parte están las percepciones que tenemos de los experimentos que hacemos en las clases de ciencias naturales y por otra las explicaciones ya dadas; y suponemos que colocarlas juntas en el salón, ya las relaciona.

Teniendo en cuenta el anterior inconveniente, se generan las primeras rutas de trabajo, en donde se inicia por pensar en la forma en la que se lograban dar explicaciones a este tipo de reacciones en momentos históricos en donde el término de electrón no estaba estipulado, además, de ser posible generar explicaciones teniendo en cuenta lo evidenciable (por nuestros sentidos) en las reacciones tratando de no recurrir a la popular pérdida y ganancia de electrones para dar respuesta a lo que ocurre en las reacciones de óxido - reducción.

En este sentido, esta investigación se orienta a enfrentar una de las principales dificultades epistemológicas y didácticas presentes en la enseñanza de la óxido - reducción en el aula de clase: la comprensión abstracta del electrón como entidad explicativa de los cambios químicos. Esta

dificultad no solo genera vacíos conceptuales en los estudiantes, sino que pone un límite a la posibilidad de generar un vínculo entre el conocimiento químico y la experiencia sensible. Por la anterior razón la investigación retoma los experimentos de Bunsen y Roscoe (1862) en mayor proporción, ya que fueron estos autores quienes demostraron que la luz provoca transformaciones químicas medibles, dando origen a la fotoquímica. Desde esta perspectiva, el uso de la cámara estenopeica y el proceso de revelado fotográfico se convierte en un espacio ideal para observar, sin recurrir inicialmente a formalismos electrónicos, cómo la energía luminosa induce la reducción de los haluros de plata a plata metálica visible. Así, la imagen surge del papel fotográfico no solo como una representación visual, sino como la huella palpable de los procesos de óxido – reducción, lo que permitirá que los estudiantes reconozcan a través de sus sentidos, la naturaleza transformadora de la luz y generan una comprensión de manera fenomenológica de la dinámica de la oxidación y la reducción antes abordada desde el lenguaje de los electrones.

Como se menciona en los párrafos anteriores, las dificultades que se presentan en el aula de clase tienen una gama bastante amplia de vertientes por donde los investigadores pueden ir, pero para el caso de esta investigación a continuación se presentan los propósitos y proyecciones que va a seguir.

2. PROPÓSITOS Y PROYECCIONES DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de esta investigación se orientó en la comprensión de los procesos sobre la oxidación y reducción desde una perspectiva histórica y experimental, en donde el análisis de algunas fuentes históricas, la construcción de los fenómenos y la práctica pedagógica se articularon para construir un camino para reflexionar sobre la enseñanza de la química. La intención de esta investigación no fue solamente estudiar un tema relacionado con las ciencias naturales, en este caso la química, sino reconstruir el modo en que ciertos fenómenos (concretamente la acción de la luz sobre los haluros de plata en el papel fotográfico) han permitido que la ciencia pueda construir significados y organizar las experiencias.

En primer lugar, se buscó reconocer los fundamentos históricos que han dado forma a la comprensión de las reacciones de óxido - reducción, recuperando ideas y prácticas de autores que marcaron su desarrollo, como lo son Boyle, Agrícola, Lavoisier, Bunsen y Roscoe. A partir de esta revisión, se establecieron criterios que orientaron la construcción de una fenomenología de la oxidación y la reducción, entendida como la manera en la que estos procesos se manifiestan, se

describen y se hacen comprensibles para la actividad experimental y para la formalización conceptual.

De esta reflexión histórica surgió también la necesidad de elaborar un conjunto de montajes experimentales que materializaran los principios identificados en cada uno de los autores. Estas prácticas experimentales buscaban recrear condiciones bajo las cuales los fenómenos se hicieron visibles para los científicos, y que al mismo tiempo puedan hacerse percibibles para mis estudiantes; que ellos pudieran además de observar, comparar y representar estos principios, cuando se pongan en cuestión a los haluros de plata interactuando con la luz. La experimentación en este sentido no se concibe como una simple comprobación de teorías o como una replicación de las prácticas, sino como la construcción de un sentido frente al fenómeno químico que se está presentando.

Finalmente, el trabajo se proyectó hacia la creación de una ruta metodológica que integre la revisión histórica, la experimentación y reflexión conceptual. Esta investigación pone en juego el caso de la oxidación y la reducción desde la experiencia en la que guiando a los estudiantes en la observación y en el análisis de los cambios materiales y luminosos que se evidencian en quien se oxida y en quien se reduce. De esta manera, la enseñanza de las ciencias naturales se transforma en un espacio de diálogo entre la historia, la experimentación y la comprensión de los fenómenos que conforman el mundo natural.

Como se menciona en los propósitos y proyecciones, la percepción de efectos sensibles y el experimento fueron parte fundamental de la investigación a la hora de observar los fenómenos, (en nuestro caso, las reacciones detrás de la cámara estenopeica) por lo que tuvimos que considerar el papel del experimento en el aula; para ello inicialmente presento la postura sobre las prácticas experimentales a la hora de generar conocimiento.

3. EL PAPEL DE LA EXPERIMENTACIÓN, EL EXPERIMENTO Y LAS ACTIVIDADES EXPERIMENTALES EN EL AULA DE CIENCIAS NATURALES

La experimentación ocupa un lugar central dentro de la historia del desarrollo científico en lugares como el aula de clase, cuando se habla de enseñanza de las ciencias naturales. Sin embargo, considero que, dentro del aula de clase, el sentido de la experimentación se ha reducido a la aparente verificación de las teorías previamente establecidas en los libros de texto o se ve reducida a la repetición de procedimientos que ya han sido estandarizados por otros autores. Este sentido tan

superficial que se le ha dado al experimento dentro del aula desvincula la posibilidad de que el estudiante pueda generar la construcción de sus propios significados, les dificulta la comprensión de los fenómenos naturales que los rodean y genera una barrera que impide la reflexión epistemológica que sustenta la práctica experimental.

Desde una perspectiva histórico - crítica, la experimentación no se concibe únicamente como un conjunto de técnicas o manipulaciones, sino como un modo de organizar la experiencia y construir fenomenologías (Malagón et al., 2011). Teniendo en cuenta lo anterior, el experimento se convierte en una herramienta epistemológica y pedagógica que le va a permitir al estudiante construir sus propias explicaciones, generar formas de hablar propias sobre el fenómeno y avanzar en procesos de formalización que le permita generar posturas conceptuales.

3.1. El experimento como construcción de experiencia y comprensión

En el texto “Construcción de fenomenologías y procesos de formalización” (Malagón, J. F., Ayala, M.M. y Sandoval, M., 2013); se plantea que el experimento no es una instancia subordinada a la teoría, sino que se entiende como un proceso de organización de la experiencia sensible, que posibilite la comprensión de los fenómenos naturales de los que se esté interesado en el mismo. Por lo anterior se puede clasificar la actividad experimental en torno a las contribuciones que genera cuando se da una mediación entre el sujeto y el fenómeno de la siguiente manera:

- Ampliación de la experiencia sensible del estudiante: Le permite al sujeto observar, comparar, medir y clasificar los fenómenos.
- Construcción de magnitudes y formas de medida: Estas magnitudes y medidas surgen de la interacción con el fenómeno que se está observando.
- Generación de problemas conceptuales: Se hacen necesarias nuevas formas de explicar y de representar los fenómenos con las diferentes observaciones realizadas.
- Articulación de lo cualitativo con lo cuantitativo: Se supera la dicotomía entre lo cualitativo y lo cuantitativo como aspectos que van en vías contrarias (Malagón et al., 2011).

El experimento, con esta concepción fenomenológica no servirá para validar teorías ni tampoco se reducirá a la comprobación, sino que será esencial para que se puedan producir formas de organización de la experiencia, que tengan como objetivo la posibilidad de generar una formalización. En este sentido, la experimentación se convierte en un espacio donde el estudiante

construye significados y se enfrenta a la naturaleza desde su propia experiencia y desde su propio lenguaje.

En síntesis, el experimento entendido desde una mirada fenomenológica deja de ser un procedimiento para comprobar teorías y se transforma en un medio que permite construir experiencias y comprensiones. Esta forma de pensar reconoce que el conocimiento no surge de la simple manipulación de las variables, sino del encuentro reflexivo entre el sujeto y el fenómeno. De esta manera, el aula se convierte en un espacio en donde el estudiante experimenta para comprender y no para verificar; en donde el estudiante además observa, compara y mide convirtiendo estas acciones en actos de pensamiento. En este sentido, el experimento se consolida como una herramienta de formación del juicio científico, que permite que las experiencias sensibles se organicen en torno a los significados compartidos y finalmente se formalicen como conocimiento. El cambio de pensamiento de la verificación a la comprensión exige un cambio en la función del experimento, ya que deja de ser un instrumento de demostración para convertirse en una práctica reflexiva y abierta, en donde el error y la incertidumbre no son concebidos como fallos, sino como oportunidades para pensar.

3.2. La actividad experimental en el aula, el paso de la verificación a la construcción de fenomenologías

En las prácticas docentes tradicionales, se le entrega al profesor las actividades experimentales como si fueran una receta ya pregenerada, en donde ya se conocen los resultados que se deben obtener y se evita en lo más mínimo la exploración por fuera de la metodología entregada. Esta forma de encarar el trabajo práctico refuerza la visión empirista y positivista de la ciencia, en la que los estudiantes se convierten en meros ejecutores (Gil y Valdés, 1996; Hodson, 1993).

Para tratar con este obstáculo se propone asumir la actividad experimental, desde una perspectiva en la cual los estudiantes logren asumir un rol activo cuando llegan a enfrentarse con el fenómeno y construir desde sus experiencias y su interacción con el mismo, explicaciones propias sobre lo que está ocurriendo en su entorno.

Entonces entenderemos la experimentación como una actividad intencional y reflexiva que está ligada estrechamente con procesos de formalización, en donde el docente guiará al estudiante con respecto a las formas de observación, de descripción y de representación de los fenómenos.

Este enfoque de la experimentación rompe la dicotomía de la teoría - práctica y de lo cualitativo - cuantitativo, haciendo que se cree en el aula de clase un espacio para la producción de conocimiento y no sea un espacio de simple aplicación de conceptos (Malagón et al., 2011; Romero y Rodríguez, 2006).

En el aula de clase la actividad experimental cobra sentido cuando se asume como un proceso de construcción de fenomenológicas, y no como una simple ejecución de las recetas entregadas por los maestros y ya preestablecidas. Esta transformación en el aula implica reconocer al estudiante como un sujeto activo que problematiza lo que observa, formula hipótesis y reconstruye su experiencia mediante la comunicación con el docente y con sus compañeros. Desde este punto de vista, el aula de clase se resignifica como un espacio en el que se investiga y se construye de manera colectiva los saberes, en donde la teoría surge de la práctica y la práctica se reinterpreta a la luz de la teoría.

3.3. El papel de la experimentación en la formación de los docentes y en la enseñanza de las ciencias naturales

Desde un punto de vista formativo, la experimentación es fundamental para que los futuros docentes comprendan a las ciencias naturales como una actividad humana, histórica y social. Durante las clases que se presentaron en algunos seminarios de la maestría en docencia de las ciencias naturales de la Universidad Pedagógica Nacional, nosotros como estudiantes diseñamos y ejecutamos nuestros propios experimentos, basados en intereses propios, y logramos desarrollar una visión más crítica del conocimiento científico, comprendiendo la dialéctica entre la teoría y el experimento, ya que en todos los casos se crearon los pasos para intentar responder a la naturaleza del fenómeno. En algunos casos el reconocimiento de la función de los instrumentos y de los procesos de medida fueron condiciones que posibilitaron el fenómeno. (Hacking, 1983; Romero, 2002).

De la misma manera la actividad experimental posibilita que el docente que se está formando reconozca que no somos transmisores de conocimiento, sino que el conocimiento se construye cuando se interactúa con el fenómeno, los lenguajes y el contexto. En este punto el experimento se convierte en un medio para articular los saberes científicos con los saberes de la cotidianidad, y en todos los casos se favorecen procesos de diálogo, argumentación y generación de nuevos significados conceptuales (Latour y Woolgar, 1995; Malagón et al., 2011).

En el ámbito de la formación de docentes, la experimentación adquiere un valor formativo esencial, ya que permite comprender que la ciencia no es un cuerpo acabado de verdades, sino una actividad humana y está socialmente situada. La posibilidad que da la ciencia de diseñar, ejecutar y analizar los propios experimentos ayuda a los futuros docentes a que se pueda reconocer la relación entre la teoría y la práctica, así como llegar a determinar la importancia de los instrumentos y los procedimientos en la producción del fenómeno. En este sentido, el experimento se convierte en un acto apropiado para el conocimiento científico, en donde el docente formado y el docente en formación aprende a construir significados a partir de la interacción con la naturaleza, el lenguaje y los contextos. Estos procesos de relación que se generan fortalecen la autonomía pedagógica del docente y le permite posicionarse como un puente entre los saberes científicos y los saberes cotidianos, generando en los estudiantes una comprensión más humana y crítica de las ciencias.

3.4. Actividades experimentales como medio de formalización en el aula

Las actividades experimentales en palabras basadas en el texto “Construcción de fenomenologías y procesos de formalización” (Malagón, J. F., Ayala, M.M. y Sandoval, M., 2013), se estructuran en torno a la idea de pasar de la experiencia cualitativa a la posibilidad de construir magnitudes y relaciones en términos cuantitativos, es decir, que los aspectos cualitativos se puedan medir a partir de la creación de los instrumentos adecuados. Para llegar a este punto los estudiantes deben reconocer las cualidades del fenómeno que se está observando y deben poder organizar las cualidades mediante observaciones que permitan generar clasificaciones. También deben establecer relaciones entre las variables que se observaron y crear la posibilidad de producir nuevas formas de medidas de estas variables. Y, por último, se logran formalizar las observaciones en representaciones, modelos o explicaciones que integran lenguajes, símbolos y conceptos científicos.

Se debe entender que este proceso no siempre va a seguir una ruta única y cerrada, sino que se deben tener en cuenta las diferentes reflexiones que se generen desde la experiencia, el lenguaje y los conceptos. De esta manera el aula de clase se convierte en un laboratorio de pensamiento, en donde la experimentación se vuelve inseparable de la comprensión del mundo natural.

Finalmente, las actividades experimentales se consolidan como un medio para la formalización del conocimiento, al posibilitar el tránsito de la observación cualitativa hacia la construcción de magnitudes, medidas y modelos explicativos. Este proceso permite que los

estudiantes puedan hacer la traducción de sus experiencias en representaciones simbólicas y científicas en donde se integran el lenguaje, la medida y la conceptualización. La formalización no será entonces el punto de llegada impuesto por el maestro o desde afuera, sino el resultado de un proceso de reflexión progresiva que se va generando gracias a la experiencia vivida. De esta manera, la experimentación constituye un camino que une la curiosidad inicial con la comprensión profunda de los fenómenos naturales.

3.5. Implicaciones pedagógicas y epistemológicas de las actividades experimentales

Ahora hablando desde el punto de vista pedagógico, la actividad experimental puede llegar a promover la autonomía y la argumentación crítica del estudiante en el aula. Lo anterior puede permitir que el estudiante aprenda a generar preguntas, a interpretar significados y a construir sus propias respuestas, en todos los casos desarrollando habilidades de pensamiento científico más allá de la manipulación técnica en el experimento.

Desde la epistemología, la experimentación le mostrará al estudiante que los fenómenos científicos no son naturales por sí solos, sino que todos los efectos han sido contruidos gracias a la interacción del sujeto, de los instrumentos y de la naturaleza (Hacking, 1983; Mach, 1890). Enseñar ciencias naturales implica entonces enseñar también que las personas construyen, representan y transforman la realidad a través de las prácticas experimentales. Por lo anterior, este enfoque que se le da al experimento genera un significado nuevo para los docentes que enseñan química, física o biología, en donde se aparta la idea de la transmisión de leyes cerradas y se abren las puertas a pensar la enseñanza de las ciencias naturales como procesos de construcción de conocimiento que involucran la experiencia, el lenguaje y la cultura.

Desde la concepción de la actividad experimental como un espacio de construcción de experiencia y de formalización del conocimiento, se derivan profundas implicaciones pedagógicas, didácticas y epistemológicas. Desde el punto de vista pedagógico, la actividad experimental implica reconocer al estudiante como un sujeto activo en el conocimiento, capaz de producir sentido a partir de su relación directa con los fenómenos, superando el rol pasivo de receptor de verdades ya establecidas. Desde la mirada didáctica, la actividad experimental supone un cambio en la función del experimento dentro del aula, ya que deja de ser un ejercicio de comprobación o ilustración para convertirse en una práctica reflexiva, abierta y problematizadora, en donde el error, la duda y la reflexión son parte de la construcción de los aprendizajes. Por último, desde la

epistemología la actividad experimental rompe con la visión positivista que separa la teoría de la práctica, proponiendo una ciencia entendida como una construcción histórica, social y fenomenológica, en donde el conocimiento surge de la interacción entre la observación, el lenguaje y la experiencia. Las implicaciones pedagógicas, didácticas y epistemológicas invitan a repensar la idea de la enseñanza de las ciencias naturales no como transmisión de conceptos, sino como una práctica formativa que integra la experimentación, la reflexión y la comprensión del mundo.

Ahora bien, retomando las dificultades en la enseñanza de la oxidación - reducción, y teniendo como referencia la reacción del papel fotográfico en la cámara estenopeica, que será nuestro instrumento central en la investigación, se debe considerar que lo primero que ocurre es una reacción en el papel fotográfico, en donde uno de los papeles centrales lo desempeña la luz; se generan preguntas en torno a: ¿qué efecto tiene la luz en las reacciones de oxidación reducción? ¿Químicamente, cómo se genera la transformación de las sustancias involucradas en las reacciones con luz? ¿La cantidad de luz influye en la cantidad de producto de reacción? ¿Las diferentes longitudes de onda pueden afectar el fenómeno de la oxidación - reducción? ¿Se podrá medir la cantidad de luz necesaria para que se produzca la reacción química?

Para dar respuesta a las preguntas propuestas se inicia con un análisis de textos escritos por Robert Bunsen y Henry Roscoe en torno a la dinámica de la luz en las reacciones químicas. La elección de los textos escritos por Bunsen y Roscoe (1857), ya que se encontró que ellos instalan el campo de la fotoquímica. Cabe aclarar también que antes de Bunsen y Roscoe ya otros autores habían hablado sobre los efectos de la luz en diferentes sustancias, pero todos estos trabajos permanecieron bajo el plano de la observación cualitativa. Bunsen y Roscoe (1857) en cambio fueron los primeros en otorgar al fenómeno un tratamiento cuantitativo y controlado, estableciendo algunas condiciones experimentales que fueron necesarias para medir la relación entre la intensidad luminosa, el tiempo de exposición y los efectos químicos. Es importante mencionar también que aunque Bunsen y Roscoe (1857) no hablan directamente de reacciones involucradas con la fotografía o con la cámara estenopeica que es el interés de este estudio, los autores fueron escogidos ya que sí generan un acercamiento a las reacciones con luz, en donde la intensidad de la luz, las cantidades de luz que afecta a la materia y otros factores fueron fundamentales para estudiar el fenómeno. De esta manera, aunque no se habla directamente de las reacciones en la fotografía, sí fueron importantes para proponer montajes experimentales para explicar el fenómeno de oxidación - reducción en el papel fotográfico.

4. INVESTIGACIONES FOTOQUÍMICAS DE BUNSEN Y ROSCOE.

4.1. Investigaciones fotoquímicas: medición de la acción química de la luz.

Bunsen y Roscoe (1857) comentan que Draper hizo la electrólisis de ácido clorhídrico, para después gracias a la interacción entre los gases producidos (hidrógeno y cloro) volver a generar el ácido clorhídrico pero esta vez por la intervención de la luz en la reacción. El tiempo de desaparición de los gases (formación del ácido clorhídrico) era una evidencia de los rayos químicos¹. Según los autores, el método utilizado por Draper tenía errores en el hecho de que la composición de los gases no era perfectamente constante. Esto se explica ya que los gases después de la electrólisis son disueltos en agua y al tener coeficientes de absorción diferentes deben considerarse tiempos también diferentes para que se genere una proporcionalidad en la solución formada, de lo contrario no se puede hablar de que en el agua hay una mezcla 1:1 de hidrógeno y cloro. Otro error era la presión, ya que esta variable no se controlaba en el sistema, permitiendo pérdidas en los gases generados por la electrólisis, haciendo que las proporcionalidades en los gases generados no se pudieran asegurar como 1:1 tampoco en este sentido.

Los autores mencionan que para generar un método sin errores se hizo una electrólisis del ácido clorhídrico acuoso para obtener hidrógeno y cloro en volúmenes iguales y completamente puros, sin óxidos de cloro u otros compuestos secundarios de la siguiente manera: la electrólisis se hizo usando 4 pilas en serie en donde el cloro es liberado desde el ánodo y el hidrógeno es liberado desde el cátodo, siendo ambos gases absorbidos por el líquido². Lo anterior hacía que el color del líquido se intensifica, todo según la cantidad de ácido clorhídrico y cantidad de corriente que se usará en el inicio de la electrólisis. Los autores mencionan que se obtienen cloro e hidrógeno en las mismas cantidades cuando se usan electrodos de carbón y de platino con intensidades de corriente diferentes, según un procedimiento que se intentará explicar más adelante.

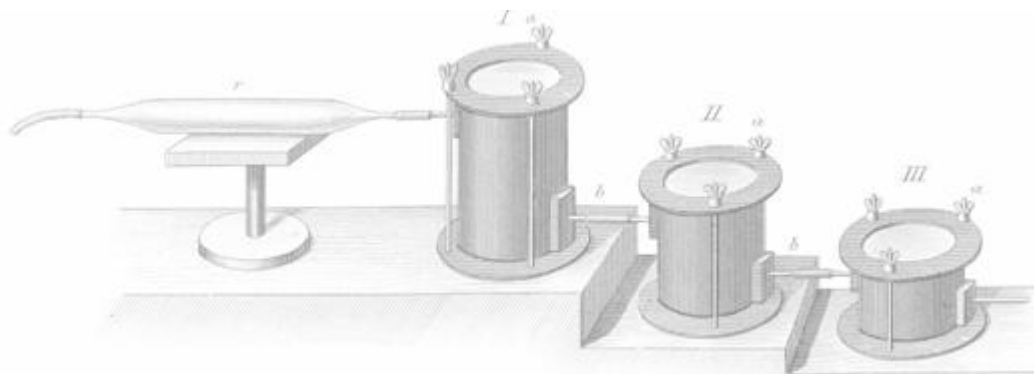
Para determinar las cantidades de gases que se producen en la electrólisis se introducen en 3 cilindros sellados los gases producidos en la reacción; este gas producido hace que el gas atmosférico interno en los cilindros se desplace hacia el exterior de ellos hasta ocupar todo el espacio. Una vez llenos los cilindros con los gases producidos en la electrólisis del ácido clorhídrico

¹ Los rayos químicos se refieren a la luz que afecta la reacción química, para el caso de los autores la reacción entre el hidrógeno y el cloro para la formación de ácido clorhídrico

² Se hace referencia al agua cuando se menciona “el líquido”. Todo el sistema está completamente lleno de agua, que va a ser el medio en el que se van a disolver los gases producidos en la electrólisis (hidrógeno y cloro).

se adapta en una de las salidas un recipiente con yoduro de potasio, este compuesto reacciona con el gas cloro del interior de los cilindros para producir yodo como uno de los productos de reacción. Por medio de una valoración con ácido sulfuroso se calcula la cantidad de yodo que se produce en la reacción y en este sentido se calcula la cantidad de gas cloro que había en los cilindros. Para determinar la cantidad de hidrógeno se resta la cantidad de cloro calculado gracias a la valoración y la cantidad de gas total que ingresó en los 3 cilindros. Para poder tener más claridad del montaje realizado por los autores se adjunta la siguiente imagen:

Imagen 1. Montaje utilizado por Bunsen y Roscoe para calcular la cantidad de gas cloro y de gas hidrógeno producido en la electrólisis del ácido clorhídrico.



Nota: Tomado de Photo-Chemical Researchers Part I. Bunsen y Roscoe (1857, plancha XVII).

En la imagen anterior se muestran los tres cilindros de los que se habla, en los que estaban contenidos los productos de reacción en la electrólisis del ácido clorhídrico (gas cloro y gas hidrógeno). Los productos de reacción ingresan a los cilindros por la conexión que se aprecia al inicio de la imagen en el cilindro III, luego se van desplazando hacia los cilindros II y I por medio de las conexiones que se marcan como b. Por último, los gases pasan al recipiente r a la izquierda de la imagen en donde se genera la reacción del gas cloro con el yoduro de potasio para posteriormente hacer la valoración con el ácido correspondiente.

Los autores muestran una tabla con los resultados que tuvieron en los experimentos de obtención de los gases cloro e hidrógeno. La tabla de la serie de experimentos 1, que se muestra a continuación deja ver la proporcionalidad entre el cloro y el hidrógeno en los experimentos realizados.

Tabla 1. Experimentos de proporcionalidad entre cloro y el hidrógeno obtenido por electrólisis.

	Capacity of vessel.	Temperature. T.	Barometer. P.	n.	t.	t'.	α .	C ₁	Chlorine found. C.	Chlorine calculated $\frac{1}{2} C_1$
Exp. 1.	34.81	11.3	0.7363	2	66.1	57.7	0.002443	32.385	16.02	16.19
Exp. 2.	34.81	11.6	0.7415	2	67.0	58.3	0.002443	32.580	16.27	16.29
Exp. 3.	190.24	11.5	0.7518	6	79.6	66.6	0.0024869	180.590	89.96	90.28
Exp. 4.	61.01	12.9	0.7393	2	71.9	15.2	0.0024869	56.672	28.15	28.34
Exp. 5.	64.27	12.9	0.7393	2	77.4	19.5	0.0024869	59.700	29.61	29.85
Exp. 6.	51.60	12.9	0.7393	2	76.7	45.7	0.0024869	47.931	23.57	23.96

Nota: Tomado de Photo-Chemical Researchers Part I. Bunsen y Roscoe (1857, página 358).

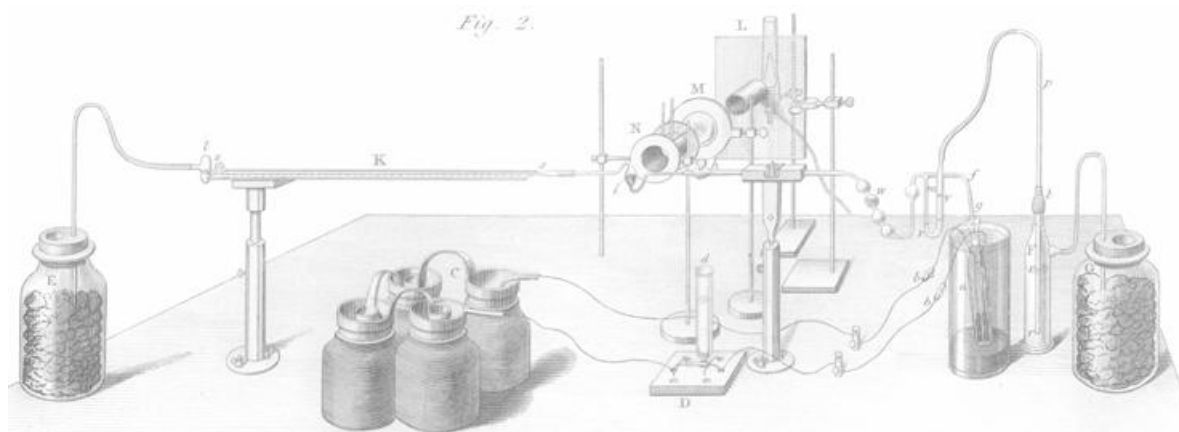
En la tabla se pueden observar variables que se comenzaron a tener en cuenta en este punto, como, por ejemplo, la temperatura o la presión, las cuales no eran consideradas en experimentos anteriores. También se debe tener en cuenta que, aunque no se menciona en la tabla el gas hidrógeno obtenido, los autores hacen referencia a que se muestra la cantidad de cloro obtenida por medio de la valoración y la cantidad de cloro calculado como la resta entre el cloro obtenido en la valoración y la cantidad de gas total, a lo que ellos denominan cantidad de hidrógeno en el gas total. Por medio de los experimentos realizados se establece la proporcionalidad entre los gases hidrógeno y cloro en la electrólisis del ácido clorhídrico.

En este punto surge la pregunta: ¿ocurre la combinación del gas hidrógeno y del gas cloro en la oscuridad a temperatura ambiente o es necesaria la presencia de luz o como los autores denominan “rayos químicos”?

Para responder a la pregunta que surge los autores repitieron los experimentos realizados, pero esta vez en total oscuridad para verificar la afinidad entre el gas cloro y el gas hidrógeno sin la interacción de los rayos químicos. Finalizados los experimentos se dieron cuenta que la cantidad de cloro después de 21 horas no cambia, lo que indica que la luz es necesaria para que se genere la combinación entre el gas cloro y el gas hidrógeno. En este punto surge el término de la acción química de la luz como una unidad de medición para la cantidad de gas cloro y de gas hidrógeno que se combinan.

El montaje experimental utilizado para hacer las mediciones de la acción química de la luz es el siguiente:

Imagen 2. Montaje experimental utilizado por Bunsen y Roscoe para la medición de la acción química de la luz.



Nota: Tomado de Photo-Chemical Researchers Part I. Bunsen y Roscoe (1857, plancha XVII).

En el montaje se genera la electrólisis en la parte *a* del instrumento, se debe tener en cuenta que en el montaje se utiliza un circuito en serie para generar la corriente. Este circuito tiene una especie de resistencia que permite que se controle la cantidad de corriente, de esta manera aumentar o disminuir la cantidad de los gases cloro e hidrógeno que se generan. El gas generado en la electrólisis pasa por unos tubos que contienen agua hasta el grifo *h*, en donde se conecta con el tubo *K*, sin antes pasar por *i*, que es donde se expone a la acción química de la luz. Cuando termina el proceso el gas que está disuelto en el agua pasa al tubo *L* para finalizar en el condensador *E* que contiene cal apagada y carbón vegetal para contener el cloro.

Cuando se realiza este proceso el agua que está en todo el sistema se satura gradualmente lo que en un punto llegará a un máximo de saturación que hará que los volúmenes de cloro e hidrógeno sean de 1-1. En este punto es donde se inicia con el proceso de exposición de los gases a la luz para poder hacer las mediciones correspondientes.

El sistema está sometido a diferentes presiones dependiendo del lugar en donde se encuentre el gas disuelto en agua, entre más cerca se encuentre del condensador *E* la presión lo afecta en menor medida. La presión puede alterar la saturación del agua por lo que debe generarse una presión constante en todo el sistema para que el equilibrio 1-1 del gas cloro y del gas hidrógeno se conserve. Para regular la presión se juega con la cantidad de corriente que se suministra al sistema y cuando el grifo *h* se encuentra cerrado el gas que se produce en la electrólisis es medido gracias a una especie de manómetro *m* que se conecta con una unión de caucho *p*, que se gradúa

según si se desea aumentar o disminuir la presión del sistema. Este caucho p se conecta con un tubo F que contiene agua (como el resto del sistema) y que a su vez se conecta con un segundo condensador G que tiene cal apagada y carbón vegetal.

El gas producido en la electrólisis además es protegido por unas pantallas que evitan la transmisión de calor externo o del experimentador hacia el sistema. La parte inferior del sistema a es llenada con mercurio que ayuda a sostener el recipiente en donde ocurre la electrólisis hacia arriba y no permite que toque el fondo del cilindro en el que está el ácido clorhídrico.

En el procedimiento se consigue el equilibrio cuando se deja pasar el gas producido en la electrólisis en ambas direcciones (hacia el condensador E y hacia el condensador G). Luego que se alcanza el equilibrio se cierra la llave h y se mide la disminución de gas³ en la sección ss.

Para poder generar la electricidad en el sistema los autores mencionan que utilizan hilos de platino, pero se consumen a causa del gas cloro producto de reacción en la descomposición del ácido clorhídrico, de tal forma que se hace un tratamiento en el que funden vidrio para hacerle una envoltura a los hilos de platino y después poder fundir el platino descubierto a la placa de vidrio para que de esta manera el gas cloro no entre en contacto con el metal. También se tiene en cuenta que el carbón de los electrodos no se debe tocar con el gas generado en la electrólisis, ya que gracias al tratamiento del carbón⁴ para la elaboración de los electrodos puede llegar a ser inflamable.

Teniendo en cuenta lo anterior, se inicia con los experimentos en los que se tiene como objetivos medir la acción fotoquímica necesaria para que se genere la reacción de síntesis de los gases cloro e hidrógeno para la producción de ácido clorhídrico. Inicialmente se menciona por parte de los autores un nuevo término: inducción fotoquímica. La inducción fotoquímica la incluyen para explicar que la acción química de la luz no comienza de inmediato en los experimentos, es decir, cuando los gases son expuestos a la luz no es inmediata la transformación, sino que, va aumentando en el transcurso del tiempo sin poderse percibir de manera clara.

³ Cuando se menciona la disminución de los gases se hace referencia a la transformación de los gases cloro e hidrógeno en ácido clorhídrico de nuevo, todo esto gracias a la acción química de la luz.

⁴ El tratamiento al que es sometido el carbón es que lo llevan a una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico (denominado agua regia) y lo calientan hasta que hierve el líquido. Al carbón luego lo calientan al rojo vivo y se continúa con el ensamblaje con los hilos de platino. Todo este proceso se realiza para eliminar cloruros de hierro u otros contaminantes volátiles. El carbón puede ser un catalizador efectivo para que se genere la reacción entre los productos de la electrólisis por lo que puede generar explosiones que dañan los instrumentos utilizados en el montaje.

En los experimentos se logra ver cómo aumenta repentinamente la acción química de la luz percibida por la combinación del gas cloro y del gas hidrógeno. También se puede ver que si aumenta la cantidad de luz también aumenta la acción química. Para la medición de la acción química de la luz se debe esperar a que la inducción química termine, es decir que la acción se haga constante para de esta manera iniciar las mediciones correspondientes.

En los experimentos se utilizó siempre una llama constante que fue medida para evitar alteraciones en los resultados y que no permitieran las comparaciones. Los autores mencionan que el efecto de los rayos químicos depende de las dimensiones de la llama y su intensidad por lo que se procura que las dimensiones de la llama y las intensidades en todos los experimentos sean las mismas para evitar inconvenientes.

Se hicieron un conjunto de experimentos en donde se probaron diferentes tamaños de llama para verificar la efectividad de la acción de la luz, y se pudo comprobar que entre más grande era la llama, la intensidad de los rayos químicos disminuye. Teniendo en cuenta lo anterior y verificando la intensidad de luz⁵ que se genera en cada una de las llamas, se decidió hacer todos los experimentos con una altura de llama de 100mm, ya que la diferencia en las intensidades de las llamas no era significativa, por lo que los rayos químicos que se generaban en estos focos de luz no iban a tener una variación significativa. Con esta altura de la llama se piensa que el porcentaje de error causado por las diferentes intensidades de luz no podría ser mayor al 4%, lo anterior también esperando que la composición del gas de hulla⁶ tampoco afecte el experimento.

Los autores mencionan una serie de experimentos en donde la llama, la cantidad de luz y la cantidad de corriente que usaron se mantuvieron constantes. Los resultados mostraron que la concentración de ácido clorhídrico utilizada para realizar la electrólisis también afecta el experimento, ya que dentro de las conclusiones a las que llegan es que si la concentración del ácido clorhídrico baja del 30% inicial a un 23% los gases que se producen a esta concentración no arrojan datos constantes por lo que pudieron probar, y para este caso la acción química de la luz no se puede medir⁷. También los autores mencionan que teniendo en cuenta que el instrumento tiene una

⁵ La intensidad de luz en las llamas no las pudo controlar de una manera efectiva, por lo que, aunque la llama tenía un tamaño de 100mm, las intensidades de luz variaban, pero eran muy cercanas en comparación de la intensidad de luz en llamas con tamaños más grandes.

⁶ La llama era avivada usando gas de hulla.

⁷ Se puede considerar que los gases (hidrógeno y cloro) que se generan a una concentración baja no generan datos medibles ya que las proporciones cambian y su grado de disolución en el agua también, por lo que ya no se podrían considerar proporciones 1:1.

capacidad de 1.8 centímetros cúbicos de agua se debe permitir el paso de 2000 centímetros cúbicos de gas producido en la electrólisis para la correcta disolución de los gases en agua y que se esta manera se puede generar una producción de ácido clorhídrico constante que permita la medición de la acción de la luz. La saturación del agua debe continuar con este paso de gases producto de la electrólisis hasta que han logrado pasar aproximadamente 6000 centímetros cúbicos de gas, ya que se pudo observar que si no se alcanza este grado de saturación del agua no se genera un equilibrio que se habla como necesario para poder realizar la medición de la acción química de la luz. Los experimentadores mencionan como detalle importante que durante las noches la saturación aumenta lo que se presume es por la disminución de la luz en el lugar que se ejecutan los experimentos⁸, además, dicen que los intentos que han tomado para disminuir el tiempo de preparación de la reacción para hacer las mediciones fotoquímicas sobre el cloro y el hidrógeno no han sido fructíferos⁹.

La metodología utilizada para que el proceso de obtención del gas de la electrólisis y de la medición de la acción química de la luz la mencionan de la siguiente manera: en la mañana se llena el tubo a en donde ocurre la electrólisis con ácido clorhídrico, haciendo pasar en promedio 2 burbujas del gas generado al líquido del sistema por cada segundo. Luego en la tarde la cantidad de ácido clorhídrico a disminuido un 7% aproximadamente por lo que se reemplaza por una nueva cantidad de ácido clorhídrico a la misma concentración, repitiendo el proceso de la mañana, pero con la excepción de que en la primera hora de electrólisis el gas que se produce se deja escapar para que llegue al condensador G¹⁰. Durante la noche el instrumento se protege para que no se exponga ante la luz y en la mañana siguiente se repite el proceso siempre dejando escapar la primera hora de gases que se producen una vez se haga el cambio del ácido clorhídrico. La preparación de la reacción o a el alistamiento del sistema se debe hacer repitiendo la misma metodología durante

⁸ Cabe recordar que en este punto la luz es la posible causa por la que el gas cloro y el gas hidrógeno se combinan para generar ácido clorhídrico. En las noches al no haber luz en el lugar los gases no tienen la oportunidad de combinarse, sino que se generan gases que se disuelven directamente con el agua del sistema ayudando a que se favorezca la saturación del agua.

⁹ Fructífero en el sentido que el tiempo necesario para que se genere la saturación del agua es largo, por lo que en las metodologías los autores intentan disminuir los tiempos para poder hacer la mediciones de la acción química de la luz de una manera más ágil.

¹⁰ Los autores mencionan que los gases que se producen en esta primera hora una vez se hace el cambio del ácido clorhídrico, contienen muestras impuras y un pequeño exceso de hidrógeno que puede hacer variar el equilibrio en el sistema.

3 o 6 días y en algunos casos dependiendo de las circunstancias de 6 a 9 días¹¹, pero la medición comparativa de la acción química de la luz se puede hacer durante meses haciendo pequeñas preparaciones adicionales, que consisten en generar la electrólisis del ácido clorhídrico fresco dejando pasar la primera hora de gas al condensador G y luego durante 15 minutos a 1 hora dejar pasar el gas al líquido preparado para luego abrir la llave h para poder hacer las correspondientes mediciones¹².

Bunsen y Roscoe (1857) comentan que se debe tener en cuenta que la combinación del gas hidrógeno con el gas cloro genera pequeñas explosiones, por lo que a la hora de hacer las mediciones de la acción química de la luz debe tenerse en cuenta la influencia de la llama y el calor generado por estas explosiones. Cabe aclarar que la medición de la acción química de la luz se hace teniendo en cuenta la cantidad de gas cloro y de gas hidrógeno que se logran combinar para la formación de ácido clorhídrico a causa de la luz¹³. Perceptiblemente se puede ver en el sistema como en el tubo ss ingresan los gases cloro e hidrógeno y se mezclan con el agua que se encuentra allí hasta que el líquido llega a un punto de saturación. Una vez saturada el agua con los gases de la electrólisis, el resto de los gases que se producen quedan libres en el sistema, es decir, que se pueden observar las burbujas o la fase gaseosa en el tubo. Cuando la luz comienza a interactuar en el sistema se genera ácido clorhídrico líquido que se va disolviendo con el agua, por lo que se logra ver como el volumen de gases va disminuyendo cuando va transcurriendo la reacción. Esta disminución de volumen es la que se asocia con la acción química de la luz, por lo que se puede decir que entre más gas logre desaparecer, más rayos químicos se encuentran interactuando con la reacción.

Bunsen y Roscoe (1857) también pudieron verificar que cuando la exposición de luz en la reacción cesa de manera instantánea, la acción química no cesa de la misma manera, sino que va disminuyendo en la misma proporción que disminuye la cantidad de gases que ingresan en el tubo ss. Lo anterior se puede explicar ya que la combustión del gas cloro y del gas hidrógeno genera

¹¹ Depende de los cuidados que se tienen a la hora de seguir las metodologías, es decir, si se controlan los tiempos y las cantidades se pueden considerar el periodo de 3 a 6 días, pero si se tienen dudas o se cometen errores instrumentales puede llegar hasta los 9 días de preparación.

¹² Se debe tener en cuenta que aunque la preparación es demorada, ya que requiere una saturación correcta del agua en el sistema, la medición de la acción química de la luz se puede hacer de manera repetida por varios meses usando la misma reacción.

¹³ En los experimentos realizados por Bunsen y Roscoe no tenían cómo medir las intensidades de luz como hoy en día, por lo que la medida de los rayos químicos la determinaban por la cantidad de gas que desaparecía, pero una medida como tal de la cantidad de luz que usaban no la podían controlar en ese momento.

calor, como ya se había mencionado anteriormente, y este calor que se genera no cesa sino unos instantes después de que se deja de exponer a la luz la reacción, es decir, aunque ya no hay luz en el sistema, sí hay calor (producto de las explosiones entre el cloro y el hidrógeno) que hace que las reacciones se sigan presentando, por lo que no para de manera instantánea al eliminar la interacción de la luz.

Otra posible causa de la disminución progresiva de la reacción y no instantánea a causa del cese de la luz instantánea puede ser que ya que el agua absorbe el ácido clorhídrico que se genera en la combinación de los gases, se genere un equilibrio entre el ácido clorhídrico absorbido por el agua y los gases producidos en la electrólisis, lo que permite que la reacción continúe desarrollándose a causa de este equilibrio químico.

La tercera posibilidad de esta continuidad en la reacción es que los gases a causa de la luz inicial hayan aumentado una afinidad entre ellos que beneficia su combinación y aún después de que la luz cesa exista un porcentaje de afinidad en los gases que permite que se sigan combinando después de que no hay luz en el sistema, y que esta combinación se termina segundos después ya que necesitan de la luz para de nuevo generar esta afinidad que hace que se produzca el ácido clorhídrico en la reacción.

Teniendo en cuenta las hipótesis presentadas sobre la causa de la continuidad de la reacción una vez cesa la luz, se generan 3 preguntas en torno: ¿se presenta una influencia significativa de la combustión del gas hidrógeno y del gas cloro en la medición de la acción química en este sistema?; ¿puede haber alguna cantidad de ácido clorhídrico formado por insolación que no sea disuelto en agua y que afecte las mediciones en términos de disminución de volúmenes en el sistema?; y, ¿es necesaria la presencia de luz para la combinación del gas cloro y del gas hidrógeno o teniendo en cuenta que la combinación de los gases continúa después de que cesa la luz, no será necesario el uso de la misma?

Más adelante los autores mencionan algunos detalles que pueden aclarar un poco las dudas que surgen al respecto, ya que después de hacer una serie de experimentos en los que se compararon las temperaturas iniciales y finales de la reacción y además de tener en cuenta para sus cálculos los cambios de temperaturas por causa de la combustión del gas cloro y del gas hidrógeno se llegaron a conclusiones en donde se pudo verificar que la combustión estos dos gases pueden ser

despreciables¹⁴ y no afectan la afinidad entre los gases en los experimentos. Además, en estos experimentos se comprueba que una vez cesa la intensidad de luz, la temperatura del sistema sigue siendo constante por algunos segundos gracias a la combustión de los dos gases que continúan su combinación.

En este sentido se puede hablar de la acción química de la luz sobre la reacción de combinación del gas cloro con el gas hidrógeno de manera directa como la manera proporcional de ver la cantidad de gas cloro y de gas hidrógeno que se desaparece en el sistema, si la desaparición de los gases¹⁵ es grande, se puede hablar de que hay una alta acción química de la luz sobre la luz sobre la reacción, mientras que, si la cantidad es baja, de la misma manera la acción química será baja. Los experimentos también dejan ver que la cantidad de gas que se combina es muy similar a la cantidad de gas que se produce en la electrólisis del ácido, por lo que estas transformaciones se están generando de manera casi que de inmediato en el experimento, por lo que se debe ser muy cuidadoso a la hora de hacer las mediciones. También se puede hablar de que la acción química de la luz en el momento en el que cesa la explosión de la luz en la reacción continúa por algunos segundos, y a pesar de que no se cuenta con luz, la reacción se sigue produciendo por algunos segundos, por lo que el efecto de la luz continúa ejerciendo una afinidad entre los dos reactivos.

5. INVESTIGACIONES FOTOQUÍMICAS: FENÓMENO DE INDUCCIÓN FOTOQUÍMICA

En una segunda parte Bunsen y Roscoe (1857) se encargan de profundizar en el concepto de inducción fotoquímica, entendida como la manera progresiva en la que se produce una reacción química bajo la influencia de la luz. En este mismo sentido, los autores continúan trabajando con los gases hidrógeno y cloro y la electrólisis del ácido clorhídrico.

Bunsen y Roscoe (1857) hacen especial referencia en términos como afinidad química, que es definida como una fuerza constante e inevitable que se da para la unión de partículas y la formación de compuestos. Se muestra que esta fuerza no se crea o se gana ni tampoco se pierde,

¹⁴ La temperatura que se genera gracias a la combustión de los gases cloro e hidrógeno la consideran despreciable en este caso, ya que, aunque los autores no desconocen que hay una temperatura que actúa en el sistema, también tienen en cuenta que el efecto que permite la combinación de los gases no es la temperatura sino la luz, ya que en sistemas sin luz pero con temperaturas elevadas la combinación de los gases no se generaba.

¹⁵ Cabe recordar que cuando se menciona que desaparecen quiere decir que se transforman los gases cloro e hidrógeno en ácido clorhídrico en estado líquido que a su vez es disuelto por el agua del sistema.

sino que, se ve favorecida o impedida por la causa de otras fuerzas que intervengan en los procesos, en este caso en la unión de los gases hidrógeno y cloro.

Otro término al que se refieren es a la inducción química. Este concepto lo definen como la activación interna de una reacción química para que se produzca en un instante inicial¹⁶. Bunsen y Roscoe clasifican a esta inducción química según el origen de la activación interna de la reacción, en este sentido, puede haber inducciones químicas:

- a. Fotoquímicas: En donde se genera una activación de la reacción o de la afinidad de los reactivos por acción de la luz.
- b. Termoquímicas: En donde es necesaria la acción del calor para que sea posible el inicio de la reacción química.
- c. Electroquímica: En donde debe haber acción de la electricidad para que se vea favorecida la formación inicial de productos en la reacción.
- d. Idioquímica: En donde se genera una activación de la reacción o de la afinidad de los reactivos por acción química directa¹⁷.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este análisis del texto solamente se va a estudiar la inducción fotoquímica, es decir, el inicio de las reacciones y su aumento de la reactividad por causa de la acción de la luz únicamente.

Para el estudio de la inducción fotoquímica se utiliza la misma reacción de la que se ha venido comentando, es decir, la combinación del gas cloro con el gas hidrógeno para la producción de ácido clorhídrico. Bunsen y Roscoe (1857) mencionan que la reacción no inicia de inmediato una vez es expuesta a la luz, sino que, existe un retraso, es decir, un periodo de inducción. Draper ya había mencionado en sus escritos sobre estas demoras en el inicio de la reacción y lo había justificado gracias a formas alotrópicas del cloro que se producían en la electrólisis inicial. Pero en este caso Bunsen y Roscoe (1857) rechazan esta idea, ya que, como se había mencionado antes y gracias a la titulación realizada al gas cloro obtenido de la electrólisis, se ha demostrado que no existen formas contaminantes en la reacción. Por otro lado, se puede ver que al principio de la reacción la producción de ácido clorhídrico es baja y va aumentando cuando el tiempo transcurre

¹⁶ A modo de comparación con lo que conocemos en la actualidad, se podría definir esta inducción química de Bunsen y Roscoe como la energía de activación, es decir, la energía necesaria para que una reacción se genere o cambie de reactivos a productos.

¹⁷ La acción química directa hace referencia a que no es necesario ningún “catalizador” por decirlo de esta manera, es decir, por el contrario que en los casos anteriores donde se requiere de luz, o calor o electricidad, esta clase de inducciones solo requiere el contacto de los reactivos para que se genere la reacción.

hasta un punto en donde la producción de ácido clorhídrico se hace constante. Este tiempo para alcanzar el máximo constante en la producción del ácido varía según condiciones que se mencionarán más adelante.

Para controlar la inducción fotoquímica de los gases al momento de la reacción, se controlaron diferentes variables, dentro de las condiciones que se tuvieron en cuenta la primera fue el volumen. En el experimento utilizaron cilindros de diferentes longitudes, pero con áreas iguales con el objetivo de verificar el efecto de la luz cuando se cambia el volumen de los recipientes.

Se pudo percibir que a mayor volumen en los recipientes el tiempo de inducción era mayor y por consiguiente la reacción se demoraba más tiempo en iniciar. El suceso por el cual se puede explicar este efecto del volumen sobre la inducción química es gracias a que, si aumenta el volumen, la intensidad de la luz disminuye en las profundidades del recipiente¹⁸, por lo que la mezcla que se encuentra más alejada de la fuente de luz no consigue la energía necesaria para que la reacción que se genere, y a su vez, la mezcla que se expone más a la luz adquiere la cantidad de energía necesaria para que la inducción química se genere de manera eficaz.

Otra de las variables que tuvieron en cuenta Bunsen y Roscoe fue la intensidad de la luz. Para este factor los autores utilizaron una fuente de luz con una intensidad constante, pero con la ayuda de lentes y pantallas variaron la intensidad de la luz original producida¹⁹. A modo de confirmación se pudieron dar cuenta que si utilizaban intensidades de luz mayores la inducción ocurría de una manera más rápida, mientras que, cuando se utilizan intensidades de luz bajas la inducción era mucho más demorada en la reacción. Se debe tener en cuenta que la relación entre la intensidad de luz y la inducción fotoquímica no son lineales, ya que, como se había mencionado anteriormente, al principio la reacción inicia de una manera lenta y va aumentando su velocidad hasta alcanzar un punto constante de producción de ácido clorhídrico. Lo que genera el aumento de la intensidad de luz será entonces, que este proceso para alcanzar la producción constante de ácido clorhídrico sea más rápido, pero aun así continúa presentándose el fenómeno de aumento constante.

¹⁸ Cuando se menciona que la intensidad de luz disminuye no quiere decir que la fuente de luz se apague o que baje la intensidad con la que está generando la luz, sino que los gases que se encuentran más en el fondo del recipiente no reciben la misma cantidad de luz que los que se encuentra en la parte más cercana a la fuente de luz.

¹⁹ El uso de las lentes y de las pantallas gracias a sus efectos para reflejar y refractar la luz permitió que la intensidad de luz, en algunos casos fuera mayor y en otros fuera menor con respecto a la intensidad original de la fuente utilizada.

La continuidad de la luz también fue un factor que se tuvo en cuenta dentro de las variables a considerar, ya que, los autores mencionan que la reacción ya inducida por los efectos de la luz es llevada a espacios oscuros y es dejada allí durante diferentes tiempos para verificar si el efecto inductivo continuaba o no en la reacción²⁰. El resultado obtenido por los autores ante la falta de luz fue que la inducción se pierde con el tiempo al estar en la oscuridad y la reacción deja de producirse después de algunos segundos. Pero después cuando la reacción es de nuevo expuesta a los efectos de la luz la inducción inicia de nuevo en las mismas condiciones iniciales, es decir, inicia de manera lenta, luego va aumentando y por último se hace constante en la producción de ácido clorhídrico.

Una vez comprobado el efecto de la luz en la reacción, se verifica el efecto de posibles contaminantes que puedan hacer parte de la reacción. Para poder estudiar los posibles efectos de las impurezas dentro del sistema se proponen montajes en donde intencionalmente se hacen modificaciones como: aumentar la cantidad de gas hidrógeno en el sistema, aumentar la cantidad de gas cloro en el sistema²¹, agregar cantidades de oxígeno en el sistema e insertar en el sistema ácido clorhídrico en estado gaseoso. Se pudo evidenciar que al aumentar las impurezas o afectar el equilibrio entre la cantidad de gas hidrógeno y de gas cloro originales, se afecta también la acción fotoquímica. Cuando se agregó hidrógeno gaseoso la acción fotoquímica disminuyó de un 100% a un 38%, con la inserción del gas oxígeno disminuyó hasta un 2.7% más que con el gas hidrógeno, con el aumento del gas cloro también disminuyó la acción fotoquímica pero no tanto como ocurrió en los casos que se usaron el gas hidrógeno y el gas oxígeno y por último con el ácido clorhídrico gaseoso no se va afectado el sistema significativamente.

Lo anterior se puede interpretar por el hecho de que los gases utilizados en el experimento generan un efecto catalítico sobre el sistema²² haciendo que de esta forma se produzcan reacciones alternativas que no requieren de la acción fotoquímica para que se generen. En otras palabras, se requiere que exista un equilibrio entre los gases hidrógeno y cloro para que se dé la reacción.

²⁰ Cuando se refiere al efecto inductivo se quiere comprobar si la reacción continúa la producción normal de ácido clorhídrico o se detiene al no haber luz en el sistema.

²¹ Al aumentar las cantidades de gas hidrógeno y de gas cloro en el sistema se pretende romper el equilibrio 1:1 que se tiene de los gases, es decir, que se tenga más cantidad de un gas que del otro.

²² Se puede considerar entonces que la luz ejerce un trabajo de catalizador en el sistema y que cuando se alteran las concentraciones o se agregan otras sustancias, el efecto catalizador de la luz es sustituido por estos contaminantes ajenos a la reacción entre los gases hidrógeno y cloro.

Para comprobar el efecto de la luz sobre la reacción los autores mencionan experimentos en donde de nuevo se prueba si hay reacción química cuando cesa de inmediato la luz, pero esta vez se diseña una modificación con el objetivo de verificar el comportamiento de los gases hidrógeno y cloro puros y de los mismos gases, pero con impurezas²³. Bunsen y Roscoe (1857) pueden observar que en los gases con impurezas la reacción no cesa cuando la luz se apaga, por lo que mencionan que es probable que alguna de las impurezas que tiene el sistema favorezca la reacción, es decir, que sirva como catalizador, confirmando lo mencionado anteriormente. En cambio, y como ya se había afirmado en anteriores experimentos, cuando se utiliza gas hidrógeno y gas cloro sin impurezas, es decir puro y en las mismas proporciones (1:1), la ausencia de la luz hace que la reacción se detenga de manera progresiva.

Los autores tienen una hipótesis en la que se cree que se puede generar una inducción fotoquímica por separado a cada uno de los gases²⁴ antes de la reacción. Para entender esta idea, se creía que si el gas cloro y el gas hidrógeno se exponían a la luz antes de ser mezclados se podría aumentar la inducción fotoquímica de cada uno y cuando se mezclaran más adelante el proceso de afinidad entre los átomos iba a ser mayor, por lo que al momento de la unión la cantidad de luz iba a ser menor, expresada con el tiempo más corto para producción de ácido clorhídrico. Pero al probar esta hipótesis, pudieron observar que no había mayor efecto en la inducción fotoquímica, ya que, los tiempos y las cantidades de luz utilizadas fueron muy similares en experimentos con los gases previamente inducidos y con gases sin inducir. Se llega a la conclusión de que el efecto de la luz no ejerce una acción química en los gases por separado, sino que deben estar en contacto para que surja la transformación.

Este apartado lo culminan desarrollando experimentos en torno a pruebas en las que la reacción se somete ya no bajo inducción fotoquímica sino bajo inducción idioquímica²⁵. Para este caso, se hacen reaccionar los gases hidrógeno y cloro en completa oscuridad, es decir, sin los efectos de la luz, pero utilizando bromina y una solución acuosa de ácido tartárico a modo de “catalizador”. Se menciona la palabra catalizador entre comillas, porque no es la palabra

²³ Cuando se mencionan las impurezas se refiere a las mismas modificaciones de las que se habla en el párrafo anterior, es decir: aumentando la cantidad de hidrógeno, aumentando la cantidad de cloro, agregando oxígeno y agregando ácido clorhídrico gaseoso.

²⁴ Gas cloro y gas hidrógeno.

²⁵ Recordando lo mencionado en partes anteriores del escrito, la inducción idioquímica hace referencia a la activación de la reacción gracias a la afinidad misma de los reactivos o al uso de otras sustancias químicas como iniciadores de reacción, lo que conocemos actualmente como catalizadores.

directamente apropiada, ya que, el bromo puede servir como agente oxidante al reducirse al ion bromuro y el ácido tartárico puede servir como estabilizante en la reacción de óxido reducción que se está presentando²⁶.

Observando el comportamiento de la reacción con estos “catalizadores”, se pudo ver que genera una curva similar en el mecanismo de reacción que cuando se usa la luz. En este sentido, la reacción también inicia de manera lenta hasta alcanzar un máximo de combinación y permanece constante, es decir, no es un aumento lineal como en el caso del efecto de la luz. A modo de conclusión se menciona que en todos los experimentos las curvas muestran un crecimiento no lineal y siempre se estabilizan en un punto máximo de combinación. Además, se demuestra que el anterior comportamiento se puede ver afectado por la masa del gas, la intensidad de la luz, la pureza a la que se encuentre la mezcla o la presencia de alguna sustancia que ejerza un papel de catalizador, aunque la afectación será en términos de los tiempos en los que se estabiliza la reacción o los tiempos en los que inicia la misma, pero no en el comportamiento de la curva.

6. INVESTIGACIONES FOTOQUÍMICAS: ÓPTICA Y QUÍMICA DE LOS RAYOS QUÍMICOS

En un nuevo apartado Bunsen y Roscoe (1857) se proponen determinar si hay un proceso de convertibilidad en el que la luz se transforma en otro tipo de energía, como energía química o energía mecánica. De nuevo utilizan la reacción de combinación de los gases cloro e hidrógeno para la formación de ácido clorhídrico.

Los autores utilizan una serie de términos que quisiera explicar antes de profundizar en el grueso de la explicación. En primer lugar, denominan rayos químicos a la parte del espectro luminoso que provoca la reacción química²⁷. Luego, denominan cuerpos diactínicos a los medios que son favorables para el tránsito de rayos químicos, para este caso mencionan, medios azules, violetas, incoloros, entre otros. De la misma manera, hay unos cuerpos anactínicos, que son medios

²⁶ El papel de cada uno de los reactivos en la reacción, y según (Master Organic Chemistry, 2013) cuando menciona los mecanismos de reacción que involucran la luz y en donde la luz brinda propiedades específicas a los reactivos, puede hacer referencia a que el bromo reemplaza el papel de la luz al reducirse a ion bromuro facilitando la oxidación del gas hidrógeno, lo que activa la reacción entre el gas cloro y el gas hidrógeno. A su vez el ácido lo que brinda es un medio adecuado para que se genere la reacción.

²⁷ Los autores resaltan la diferencia entre rayos químicos y la luz común o la luz visible, ya que mencionan que los rayos químicos son la porción de luz que sí logra afectar la reacción, mientras que la luz común o la luz visible aunque interviene en los instrumentos no es fundamental para que se genere la reacción química.

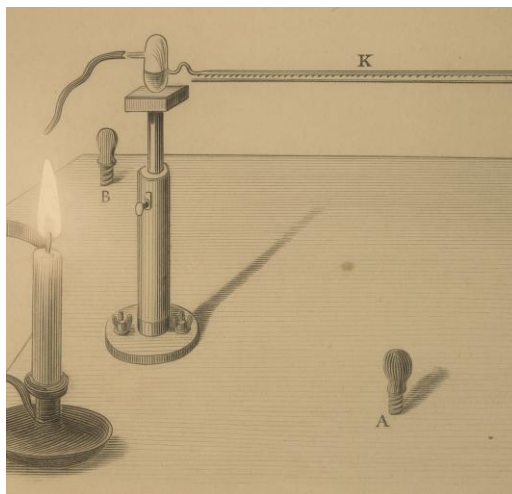
no favorables a los rayos químicos o, en otras palabras, que absorben los rayos químicos, para este caso mencionan, medios opacos, amarillos y rojizos entre otros. Los autores mencionan dos coeficientes, en primer lugar, un coeficiente de extinción (α)²⁸, que lo refieren para definir el cuánto se reduce la intensidad luminosa al atravesar por un medio. Y un segundo coeficiente denominado coeficiente de reflexión (g)²⁹, definida como la fracción de luz reflejada en la superficie de un medio.

Para comprobar si hay un gasto energético o no cuando se involucra a la luz en el experimento se desarrollan una serie de experimentos que van a dar conclusiones concretas con respecto a este objetivo.

6.1. Experimentos con diferentes tipos de vidrio

En un primer experimento compararon la cantidad de luz que se “perdía” cuando se usaban diferentes tipos de vidrios o de medios. Para poder hacer la medición de estas cantidades de luz, utilizaron una misma fuente de luz que iluminaba a los gases hidrógeno y cloro sin ningún tipo de medio que interfiera el paso de la luz, como se muestra en la imagen a continuación:

Imagen 3. Reacción de los gases hidrógeno y cloro para la formación del ácido clorhídrico sin interferentes



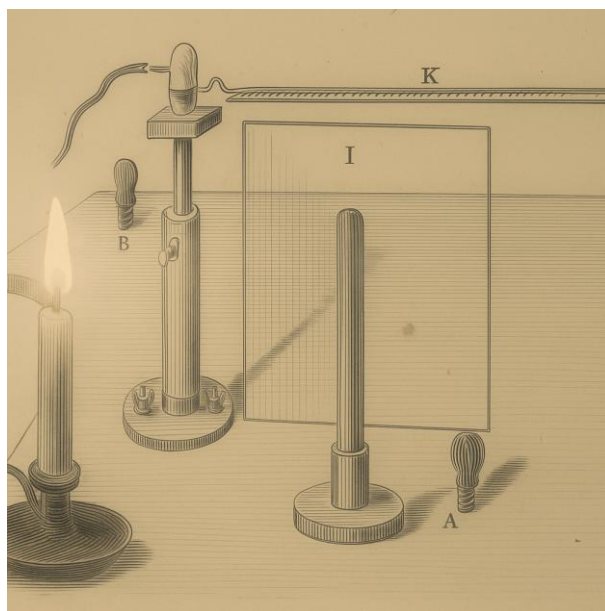
²⁸ Este coeficiente de extinción medirá entonces la cantidad de rayos químicos que es absorbida por el medio, es decir, que se determina por el tipo de vidrio que se utilice.

²⁹ En otras palabras, el coeficiente de reflexión medirá la cantidad de rayos químicos que “rebota” y no ingresa en el sistema.

Nota: Modificado por ChatGPT y tomado originalmente de Photo-Chemical Researchers Part III. Bunsen y Roscoe (1857, página 621)

Para medir la cantidad de rayos químicos que lograban afectar la reacción, los experimentadores observaron la cantidad de ácido clorhídrico formado y hablaban de una proporcionalidad entre la cantidad de producto de reacción formado y de rayos químicos que intervienen. Luego utilizando las mismas cantidades de gas hidrógeno y de gas cloro ponen a modo de filtro entre la fuente de luz y el tubo en el que se producen las reacciones diferentes medios, como los vidrios de diferentes tipos y grosores, para verificar en este nuevo montaje y con la misma fuente de luz, la cantidad de ácido clorhídrico que se formaba y poder calcular en este caso la cantidad de rayos químicos que reaccionan y de la misma manera, determinar la cantidad de rayos químicos que se perdían en el proceso³⁰.

Imagen 4. Reacción de los gases hidrógeno y cloro para la formación del ácido clorhídrico con interferentes.



Nota: Modificado por ChatGPT y tomado originalmente de Photo-Chemical Researchers Part III. Bunsen y Roscoe (1857, página 621).

³⁰ Cabe resaltar que este método era usado de esta manera, en la que la medición de la cantidad de luz se hacía por la cantidad de producto de la reacción química, ya que en la época no existían instrumentos que permitieran la medición de las cantidades de luz.

La intención era verificar si la variación de la intensidad de luz ocasionada por los medios interferentes se relacionaba con la cantidad de producto generado en la reacción, es decir, si la cantidad de ácido clorhídrico se reduce después del uso del interferente, que esta reducción fuese proporcional a la cantidad de rayos químicos responsables de la reacción.

Para este experimento también se hicieron pruebas con diferentes intensidades de luz, es decir, con fuentes de luz que visualmente mostraban distintas cantidades de luz³¹, lo anterior para verificar si se generaban cambios considerables en las cantidades de ácido clorhídrico formado. Para poder comparar los cambios en las reacciones teniendo en cuenta los cambios en las intensidades de luz o tamaño de la llama, se median las cantidades de ácido clorhídrico producido con diferentes tamaños de llama, y se iban comparando las cantidades de ácido producido cuando el montaje tenía un interferente y cuando no. Con todos los tamaños de llama se hizo el mismo proceso, es decir, se cambiaba el tamaño de la llama, se media la cantidad de ácido producido y luego, con el mismo tamaño de llama se media la cantidad de ácido producido, pero poniendo un interferente entre la llama y el tubo donde ocurre la reacción. Luego con cada tamaño de la llama utilizado se hizo un cálculo en el que dividían la cantidad de ácido producido cuando se había colocado el interferente, entre la cantidad de ácido producido cuando no había interferente. Para este caso se pudo ver que el cociente entre las cantidades de ácido producido en cada escenario se mantuvo constante cuando se hicieron variaciones en el tamaño de la fuente lumínica utilizada, lo que indicó que la absorción de rayos químicos fue proporcional en cada uno de los casos.

El aporte importante de este primer experimento se encuentra en mencionar que el tamaño de la llama es independiente cuando se pretende determinar la cantidad de luz que se “pierde” cuando hace la interacción con la reacción. Es importante mencionar que se está hablando en términos de evaluar las cantidades de luz que son efectivas en la reacción, y no del tamaño de llama que beneficia la reacción, ya que este factor fue probado en experimentos anteriores.

6.2. Experimentos con el vidrio Crown

En un segundo experimento los autores se encargan de probar un vidrio tipo crown como factor para las mediciones. Cabe resaltar que este tipo de vidrio es del que está hecho el cilindro en

³¹ Cuando se mencionan diferentes cantidades de luz se hace referencia a que los autores disminuían y aumentaban el tamaño de la llama en el mechero, por lo que se hablaba de aumentar o disminuir la intensidad de la luz, pero realmente lo que se está haciendo es modificar la llama fuente de luz.

el que se genera la reacción de combinación de los gases cloro e hidrógeno. La idea es verificar la cantidad de luz que se puede refractar o difractar³² antes de entrar en contacto con los gases. Este tipo de vidrio se utiliza teniendo en cuenta que teóricamente tiene una relativamente baja refracción y difracción de la luz, por lo que puede ser favorable para evitar que la cantidad de luz que se mide se pueda “perder” en algún sentido³³.

Tabla 2. Experimentos de cuantificación de los rayos químicos en la reacción.

	Exp. 1.	Exp. 2.	Exp. 3.	Exp. 4.	Exp. 5.	Exp. 6.
I₀	9.58	8.88	9.91	10.36	11.87	11.91
I	8.62	7.99	8.97	9.25	10.85	10.66
h (mm)	0.30	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70
ρ	0.0514	0.0514	0.0487	0.5552	0.0439	0.0540

Nota: Tomado y modificado de Photo-Chemical Researchers Part III. Bunsen y Roscoe (1857, página 605).

En la tabla anterior se pueden verificar los resultados de los experimentos realizados por Bunsen y Roscoe (1857) con el objetivo de cuantificar la cantidad de rayos químicos que se utilizan en la reacción para la producción de ácido clorhídrico. En la parte superior se pueden ver los experimentos realizados (6), en donde en todos los casos se midió:

I₀: que indica la intensidad de los rayos químicos antes de atravesar el medio. Cabe resaltar que este valor de la intensidad inicial se determina con la cantidad de ácido producido cuando no hay interferencia entre la fuente de luz y la reacción.

I: que indica la intensidad de los rayos químicos después de atravesar el medio, es decir, después de atravesar el vidrio o los interferentes puestos. Para este valor también se debe tener en cuenta que se mide en términos de la cantidad de ácido producido cuando hay un interferente entre la fuente de luz y el tubo en donde se produce la reacción.

h: va a ser el valor que indica la longitud o el espesor del vidrio o el interferente que se coloca entre la fuente de luz y el tubo en donde se genera la reacción.

³² Cabe resaltar que en la época el término de difracción se mencionaba no como lo conocemos en la actualidad, sino más bien era definido como las pérdidas de luz por dispersión cuando atraviesan un medio.

³³ Se debe tener en cuenta que para medir la cantidad de luz que se “pierde”, se usa el mismo sistema del experimento anterior, en el que se mide la cantidad de ácido clorhídrico producido en una reacción sin interferentes y luego se vuelve a medir la cantidad de ácido, pero esta vez utilizando el vidrio como una especie de bloqueo entre la reacción y la fuente de luz.

p: será el coeficiente de absorción o de extinción de los rayos químicos en el medio. Este coeficiente es calculado gracias a la ecuación de Beer - Lambert³⁴, en donde un valor de p elevado indicaba que el medio era capaz de absorber mayor cantidad de rayos químicos.

Bunsen y Roscoe (1857) relacionan las fórmulas que utilizaron para hacer el cálculo de los coeficientes g y α . En primer lugar, para calcular g indican que utilizan la siguiente ecuación:

$$(1 - g)^2 = \frac{I}{I_0} \text{ ó } g = 1 - \sqrt{\frac{I}{I_0}}$$

Esta ecuación es usada ya que suponen que en cada lámina de vidrio utilizada como interferente, la luz se refleja en una fracción de g e ingresa o traspasa el vidrio en una fracción de 1-g. También se debe tener en cuenta que como la lámina de vidrio tiene dos superficies, es decir, la entrada de la lámina y la salida, la diferencia 1-g es elevada al cuadrado. Esta relación entre la lámina de vidrio y la cantidad de luz que se refleja va a ser igualada con la cantidad de ácido que se produce cuando se compara la cantidad de ácido producido sin interferente (I_0) y la cantidad de ácido que se produce con interferente (I)³⁵. Por otro lado, la ecuación utilizada en el cálculo de α fue la siguiente:

$$\frac{1 - g}{1 + (2n - 1)g} = \alpha$$

Esta fórmula es utilizada por los autores ya que interpretan en primer lugar, que hay una fracción de luz que ingresa en el sistema (enunciada como 1-g), incluyendo la corrección de luz que se refleja con el valor de g. Pero también consideran importante hacer las correcciones del valor considerando las reflexiones múltiples que hay dentro de las láminas³⁶. Por la anterior razón mencionan en el denominador el factor: $1 + (2n-1)g$, ya que a esa cantidad de luz que ingresa en el

³⁴ En la ecuación se saca el logaritmo en base 10 del cociente entre la intensidad de luz inicial (I_0) sobre la intensidad de luz final (I) y este resultado es dividido entre el espesor del interferente, es decir el valor de h.

³⁵ La ecuación que aparece al lado de la que es explicada en este párrafo, se refiere al despeje realizado por los autores para hacer el cálculo del valor de g en los diferentes experimentos desarrollados.

³⁶ Cuando se habla de reflexiones múltiples se quiere explicar que hay varios efectos a considerar de la luz dentro del sistema, por ejemplo, algunos rayos de luz se reflejan hacia atrás cuando chocan contra el vidrio, otra porción es absorbida por el mismo vidrio internamente, etc. Los autores quieren prever todos estos factores que le puedan ocurrir a la luz dentro de sus cálculos de ingreso neto en el sistema.

sistema (1) hay que agregarle la corrección, en donde utilizan el 2 para indicar la cantidad de superficies que tiene una lámina (entrada y salida), n para proponer la cantidad de láminas que utilicen en el experimento y por último el valor de corrección de la cantidad de luz que se pueda reflejar en cada experimento (teniendo en cuenta las reflexiones múltiples que puedan participar).

Las anteriores ecuaciones se mencionan ya que en los siguientes experimentos ya que hicieron las correcciones de la cantidad de luz que ingresa y que se “pierde” en el sistema con el cálculo de los coeficientes α y g . Los resultados que obtuvieron fueron que α equivalía a 0,00623, indicando una baja disminución de la intensidad luminosa al atravesar el vidrio crown y un valor de 0,0486 para el coeficiente g , indicando una fracción muy baja de luz que se refleja en el vidrio. Bunsen y Roscoe (1857) teniendo en cuenta estos valores desarrollan un experimento en donde poner varias láminas de vidrio como interferentes entre la fuente de luz y el tubo de reacción y lograron probar que los valores de ambos coeficientes en todos los casos oscilaron alrededor del mismo valor que se menciona en la parte de anterior. En este sentido se puede decir que solo el 4,86%³⁷ de los rayos químicos se “pierden” para el cálculo, por causa de la reflexión de la luz en este tipo de vidrio.

Posteriormente se menciona en el texto que Bunsen y Roscoe (1857) experimentan con diferentes características de los vidrios³⁸. En todos los casos pudieron ver que utilizar vidrios claros es mejor que utilizar vidrios oscuros u opacos. Lo anterior ya que al comparar la cantidad de ácido clorhídrico que se está produciendo el coeficiente α es muy bajo, lo que indica que muy pocos rayos químicos se están difractado en el vidrio y de la misma manera, muy pocos de estos rayos están siendo absorbidos por el vidrio. Por el contrario, con los vidrios opacos y oscuros se reduce significativamente la cantidad de ácido clorhídrico que se produce, por lo que el coeficiente α se hace mucho más alto.

Teniendo en cuenta lo anterior los autores proceden a continuar sus experimentos usando vidrios claros, ya que el coeficiente α y el coeficiente g se hacen, por decirlo así, despreciables en

³⁷ Este valor de porcentaje que mencionan los autores lo obtienen comparando la cantidad de ácido que se produce sin el vidrio como barrera entre la fuente de luz y la reacción, y el vidrio como barrera. Este porcentaje quiere decir que alrededor del 4.86% de ácido se dejó de producir cuando el vidrio bloqueaba el sistema.

³⁸ Cuando se mencionan las diferentes características de vidrios lo que se pretende decir es que utilizaron tipos de vidrios con distintos comportamientos frente a la luz, ya que utilizan vidrios claros, oscuros y opacos para los experimentos, pero todos del mismo tipo, es decir, crown.

comparación con la cantidad de ácido clorhídrico que se produce. Cabe recordar que de este mismo material está hecho el tubo en donde ocurre la reacción de combinación de los gases hidrógeno y cloro, por lo que el objetivo de hacer estos experimentos fue determinar cuántos rayos químicos dejan de reaccionar con los gases a causa del contenedor.

6.3. Evaluación del agua como posible interferente

Una vez determinados los coeficientes α y g , Bunsen y Roscoe (1857) se preguntan si el agua³⁹ puede llegar a absorber rayos químicos y por ende pueda afectar los cálculos para la determinación de la cantidad de rayos necesarios para que degenere la reacción. La metodología utilizada para averiguar la incidencia del agua en el experimento fue muy parecida a la que ya han usado en experimentos anteriores, en donde comparan la cantidad de ácido que se produce cuando no hay interferentes con la cantidad de ácido que se produce cuando sí hay interferentes; en este caso el interferente será el agua. El montaje utilizado fue muy similar al que aparece en la imagen 4, pero esta vez en lugar de vidrio pusieron cilindros⁴⁰ llenos de agua destilada. Se menciona la palabra cilindros en plural ya que las mediciones se realizaron con columnas de agua de diferentes longitudes, con el objetivo de verificar si a mayor cantidad de agua la variación del alcance de los rayos químicos en la reacción era mayor o menor.

En la siguiente tabla se podrán observar los resultados obtenidos por los autores con respecto al experimento en mención:

Tabla 3. Resultados de los experimentos sobre la interacción del agua con los rayos químicos.

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
I_0	16.08	16.08	16.08	10.23
I	13.76	13.99	13.57	8.99
h (mm)	83.8	11.8	27.0	17.3
α	0.0002	0.0008	0.0008	0.0003

Nota: Tomado y modificado de Photo-Chemical Researchers Part III. Bunsen y Roscoe (1857, página 608).

³⁹ Se debe tener en cuenta que el agua está por todo el sistema y que inicialmente se saturó el líquido con los gases hidrógeno y cloro para después dejar gases libres como burbujas que ayudarán a cuantificar la cantidad de ácido clorhídrico formado.

⁴⁰ Los cilindros que contenían el agua estaban hechos del mismo tipo de vidrio ya evaluado en los experimentos anteriores, es decir, crown claro.

Como se puede observar en la anterior tabla, se realizaron 4 experimentos y cada uno de ellos se les midió:

I_0 : que como en la tabla 2 también se refiere a la intensidad de los rayos químicos cuando no hay interferente.

I : que de la misma manera será la intensidad de los rayos químicos cuando hay un interferente, en este caso los cilindros con agua⁴¹.

h : La longitud de los cilindros medida en mm, en donde se puede ver que se utilizaron 4 medidas diferentes, lo que indican profundidades de agua variadas en cada uno de los casos.

α : El coeficiente de extinción de los rayos químicos evaluado para las distintas cantidades de agua que se usaron como interferente.

Como se puede observar en los resultados de la tabla, el cálculo de α para el agua varía entre los valores de 0.0002 y 0.0008, aun considerando diferentes longitudes de las columnas de agua, por lo que los autores mencionan que se puede concluir que la cantidad de rayos químicos que absorbe o refracta⁴² el agua es muy pequeña, por lo que consideran este líquido como un medio adecuado para el desarrollo de los experimentos posteriores al permitir condiciones favorables para la conservación de los rayos químicos en las soluciones.

6.4. Experimentación con densidades

En un siguiente experimento Bunsen y Roscoe (1857) se propusieron determinar si la densidad del medio puede llegar a afectar a los rayos químicos dentro de la reacción. Como se mencionaba en el apartado anterior, los experimentadores se dieron cuenta que el agua no influye de manera significativa dentro de la reacción química, pero quisieron determinar si al agregarle algún tipo de colorante al líquido, éste lograría impedir que los rayos químicos hicieran sus efectos en los gases. El objetivo de los autores era poder verificar si era posible matemáticamente determinar la cantidad de rayos químicos que se difractan o se absorben según la concentración del medio en el que se encuentran los gases. La metodología utilizada para hacer el cálculo fue la siguiente:

⁴¹ Es importante recalcar que estas intensidades I_0 y I son calculadas teniendo en cuenta la cantidad de ácido clorhídrico que se produce en la reacción.

⁴² Indirectamente se habla de refracción de estos rayos, ya que, aunque no se menciona a la constante g , si se debe considerar que para el cálculo de α se debe tener en cuenta g según la fórmula mostrada anteriormente.

Se prepararon los mismos 3 cilindros de vidrio crown utilizados en el experimento del agua y en cada uno de los cilindros se agregó agua destilada con diferentes cantidades de tinta roja⁴³. Se tuvo en cuenta que entre más longitud tenía el cilindro menos densidad iba a tener la solución, siempre pretendiendo que el producto de la longitud y la densidad fuera el mismo en los tres diferentes cilindros. De la misma manera que en los experimentos anteriores, se midió la intensidad inicial y la intensidad final usando la técnica de medir la cantidad de ácido clorhídrico producido con y sin interferente.

Los datos obtenidos en este experimento se pueden ver a continuación:

Tabla 4. Resultados de los experimentos sobre las diferentes densidades de la tinta roja.

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
I_0	7.41	8.13	8.22
I	4.28	4.73	4.87
b	0.578	0.582	0.592
h	11.8 mm	27.4 mm	83.8 mm
e	1.000	0.4306	0.1408
l	0.04895	0.02123	0.00707
e/l	0.204	0.203	0.200

Nota: Tomado y modificado de Photo-Chemical Researchers Part III. Bunsen y Roscoe (1857, página 610).

En la tabla se pueden observar:

I_0 : Se refiere, como en los experimentos anteriores a la intensidad de rayos químicos iniciales, es decir, a la cantidad de ácido que se produce sin interferentes.

I : Es la intensidad de rayos químicos finales, es este caso, la cantidad de ácido que se produce cuando se coloca el interferente (solución coloreada).

b : Es el valor del cálculo realizado por medio de la división entre la intensidad final (I) y la intensidad inicial (I_0), que indica la fracción de luz que se transmite al sistema.

h : La longitud de los cilindros medidos en mm, como se puede ver se utilizaron 3 medidas diferentes: 11.8mm, 27.4mm y 83.8mm.

⁴³ Por experimentos anteriores realizados por los autores habían podido verificar que los filtros de color rojo eran grandes interferentes en las reacciones asociadas a la luz, por lo que seguramente consideraron utilizar tinta de este tipo de color como un medio muy eficaz para atenuar los efectos de los rayos químicos. Al haber una atenuación profunda de la reacción, la diferencia entre la intensidad inicial y final sería más notoria, por lo que los resultados iban a ser mucho más visibles.

e: Es la densidad de cada una de las soluciones elaboradas. Como se puede ver, entre más longitud tienen las columnas menos densidad tiene la solución, lo anterior con el objetivo de generar una proporcionalidad entre la cantidad de solución y la concentración de la misma.

l: Es la fracción de unidad de luz que es transmitida a través de la unidad de longitud de cada uno de los cilindros utilizados⁴⁴.

e/l: Es la división entre la densidad utilizada en cada uno de los casos y la fracción de unidad de luz que es transmitida en cada uno de los cilindros de diferentes longitudes.

Al considerar los valores que se obtuvieron en todos los casos de e/l, se puede ver que la razón entre las diferentes densidades de las soluciones y las fracciones de luz que lograron atravesar el interferente son muy cercanas, con valores de 0.2 en su gran mayoría. La constante que se muestra en estos cálculos dará cuenta de una tendencia matemática, esta tendencia dirá entonces, que la cantidad de rayos químicos que se transmiten al sistema van a disminuir cuando aumenta la densidad del medio que se utilice. En otras palabras, entre más concentrada esté la solución, menos rayos químicos dejará atravesar el interferente.

6.5. Experimentación con gases como interferentes

En este punto de las observaciones, Bunsen y Roscoe (1857) habían experimentado con diferentes sólidos y líquidos como interferentes. Como ya se había mencionado en los apartados anteriores, usaron diferentes tipos de vidrios, diferentes cantidades de agua y hasta diferentes cantidades de soluciones de color rojo, para determinar la cantidad de luz que se “perdía” en la reacción química.

Los autores evalúan que no han tenido en cuenta que los gases también pueden llegar a ser un interferente que pueden refractar o absorber rayos químicos. En este sentido se tiene en cuenta también, que la reacción en sí utiliza gases como reactivos, por lo que, los propios reactivos pueden llegar a ser responsables de una pérdida de rayos químicos.

Inicialmente se quiere probar si el cloro puro puede llegar a ser un interferente en la reacción⁴⁵.

⁴⁴ En este caso el valor de l es lo que se conoce en la actualidad como transmitancia, en donde este valor va a indicar la fracción de luz que atraviesa al sistema, una definición similar a la mostrada por los autores.

⁴⁵ Cabe mencionar que se están utilizando los gases en su estado puro, es decir, que no se utilizan soluciones con agua, como sí ocurre para el caso de los gases de la reacción que están disueltos en agua en el tubo K.

Para el desarrollo de la reacción se diseñó una metodología muy parecida a la que se utilizó en los otros experimentos, en donde se llenó un tubo con el gas cloro puro y se puso entre la fuente de luz y el tubo de reacción. Luego se midió la cantidad de ácido clorhídrico producido y se comparó con la cantidad de ácido clorhídrico producido cuando no había interferente.

Para calcular el efecto del gas cloro en la reacción, se compararon las cantidades de producto de reacción cuando no había interferente con las cantidades de producto de reacción cuando se interpuso el tubo con el cloro puro.

A continuación, se puede ver la tabla de resultados que obtuvieron Bunsen y Roscoe (1857) en la evaluación del gas cloro como interferente:

Tabla 5. Resultados de los experimentos usando el gas cloro como interferente.

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
I_0	13.51	10.86	11.12	11.40
I	3.79	3.25	3.23	6.39
h (mm)	83.8	83.8	83.8	27.4
P (m)	0.7437	0.7528	0.7528	0.7528
T (°C)	16.0	14.3	14.3	14.3

Nota: Tomado y modificado de Photo-Chemical Researchers Part III. Bunsen y Roscoe (1857, página 610).

En la tabla se puede ver que vuelven a mencionar los datos de I_0 para hablar de la intensidad de los rayos químicos iniciales, es decir, sin interferente y I para la intensidad de rayos químicos finales, es decir, cuando se utilizaron los interferentes con el gas cloro. Además de las dos variables ya mencionadas, también se incluyen las siguientes:

h: que es la longitud medida en milímetros de los cilindros de vidrio en donde pusieron el gas cloro. Si notamos en la tabla, podemos darnos cuenta de que en los 3 primeros experimentos se usaron las mismas longitudes de cilindro, pero en el experimento 4 se realizaron las mediciones utilizando un cilindro más pequeño. La idea con utilizar un cilindro más pequeño era verificar si el espesor del cloro iba a ser un impedimento para la producción de ácido clorhídrico en la reacción.

P: se refiere a la presión del gas dentro de los cilindros medida en metros⁴⁶. Como se puede verificar en la tabla de resultados, se intentó mantener la misma presión de gas en cada uno de los experimentos con el objetivo de mantener cantidades constantes de gas cloro. De igual manera en

⁴⁶ La m que aparece dentro de los resultados en la presión de los experimentos puede relacionarse con los metros de mercurio, una variación a lo que usamos en la actualidad como milímetros de mercurio como la unidad de medida de la presión.

el experimento 4 se mantuvo la presión, lo que indica que, aunque el cilindro tenía una menor longitud, la presión iba a ser la misma, por lo que en este experimento la concentración de cloro fue mayor.

T: en este caso la T se entiende como la temperatura en el sistema. Se controló la temperatura con el objetivo de controlar también la presión del gas dentro de la columna. Observando en los resultados, en todos los experimentos se mantuvieron constantes las temperaturas, menos en el primero en donde cambió un par de grados hacia arriba, aunque en este caso la presión fue menor lo que compensa el resultado que se obtuvo en términos de cantidad de ácido clorhídrico producido.

Para determinar la cantidad de rayos químicos absorbidos por el gas cloro, los autores tuvieron en cuenta el porcentaje de luz que se pierde por causa del tipo de vidrio con el que están diseñados los cilindros en donde se encuentra el gas y los reactivos. Después de hacer esta corrección se pudo calcular que la cantidad de rayos químicos que se pierden por causa del gas cloro es alta. Esta variación significativa se puede apreciar en la tabla de resultados, en donde la cantidad de ácido clorhídrico que se produce cuando se pone el interferente (gas cloro) es mucho más baja que cuando se tiene la reacción sin interferentes. Lo anterior quiere decir que parte de los rayos químicos que vienen desde la fuente de luz se llegan a perder por causa del cloro⁴⁷ al atravesar el gas, por lo que la cantidad de rayos químicos que llegan al final a la reacción es mucho más inferior, por lo que la reacción no produce tanto ácido clorhídrico en consecuencia.

En el experimento 4, se puede apreciar que la longitud de la columna es menor, por lo que la cantidad de rayos químicos que se gastan atravesando el interferente es menor también y en consecuencia la producción de ácido clorhídrico aumenta.

Con el objetivo de observar si el aire también absorbe rayos químicos, Bunsen y Roscoe (1857) realizan cambios en el experimento con el gas cloro, en donde hacen mezclas con gases atmosféricos⁴⁸. La idea consistía en mezclar en diferentes proporciones el gas cloro con los gases atmosféricos y medir la cantidad de ácido clorhídrico que se dejaba de producir. Con la

⁴⁷ Se puede pensar que esta pérdida a la que se hace referencia es causada por absorción de los rayos químicos en el gas cloro y no por refracción de los rayos, lo anterior debido a lo ocurrido en los otros experimentos, en donde los rayos fueron reflejados solamente por el vidrio, mientras que en las soluciones lo que ocurrió fue una absorción. Aunque las soluciones son diferentes por sus propias propiedades (unas son líquidas y las otras son gaseosas) en ambos casos la dinámica de absorción ocurre.

⁴⁸ Principalmente usan los gases nitrógeno y oxígeno.

metodología anterior se miraban dos cosas, la primera era si los gases atmosféricos (el aire) hacía que se perdieran rayos químicos y de ser esto posible, considerar esta variable para sus experimentos. Y la segunda, era ver si la proporción de cloro que se usaba era proporcional también a la cantidad de ácido clorhídrico que se dejaba de producir.

Los resultados de estas modificaciones muestran que realmente el aire no afecta a los rayos químicos, ya que entre más nitrógeno y oxígeno se agregan a la mezcla la cantidad de ácido clorhídrico que se producía era mayor. Pero también revelaron que la cantidad de gas cloro usado como interferente sí era inversamente proporcional a la cantidad de ácido clorhídrico producido, es decir, entre más gas cloro se usaba, menor era la cantidad de ácido clorhídrico que se producía⁴⁹.

Teniendo en cuenta que como se pudo ver en el experimento anterior, el cloro absorbe una cantidad de rayos químicos y no permite que se transmitan al tubo donde se encuentran los gases cloro e hidrógeno para la reacción. Con el objetivo de diferenciar si es la luz original que surge desde la fuente de luz o los rayos químicos⁵⁰ que contiene esa luz original lo que permite la reacción de producción de ácido clorhídrico, Bunsen y Roscoe (1857) plantean otro montaje que diera cuenta de esta situación. Los autores diseñaron diferentes montajes en los que pusieron el gas cloro⁵¹ dentro de cilindros de diferentes longitudes para ir probando no solo la cantidad de ácido clorhídrico que se produce en cada uno de los montajes, sino, además, poder medir la velocidad en la que se genera la producción del mismo ácido clorhídrico.

Tabla 6. Producción de ácido clorhídrico usando diferentes proporciones de gas cloro como interferente.

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6
I₀	8.45	10.93	11.13	11.10	11.39	10.65
I	2.53	3.35	4.39	4.15	5.16	5.51
h	77.6	77.6	56.1	56.1	43.6	32.2

Nota: Tomado y modificado de Photo-Chemical Researchers Part III. Bunsen y Roscoe (1857, página 613).

Cómo se puede apreciar en la tabla anterior, se midieron las intensidades iniciales (cuando no había interferente) y las intensidades finales (cuando se atravesaron las distintas columnas de

⁴⁹ Esto se puede explicar por los colores en cada de los casos, ya que el nitrógeno y el oxígeno a condiciones ambientales de presión y temperatura son incoloros, en cambio el cloro suele poseer color verdoso, por lo que seguramente los rayos químicos se gastan al atravesar este tipo de gas y no los gases incoloros.

⁵⁰ Considerando a los rayos químicos como la fracción de luz que no es observable y que hace parte de la cantidad de luz que sí se puede observar emitida desde la fuente original.

⁵¹ Ya sabiendo que el gas cloro era un interferente poderoso que evita el paso de los rayos químicos.

gas cloro) en los diferentes experimentos cambiando en algunos casos la longitud de las columnas de vidrio (h). En los resultados se ve que cuando se utiliza una columna con cloro con una longitud mayor, la cantidad de ácido clorhídrico que se deja de producir es mucho mayor y por el contrario, cuando se utiliza una columna de vidrio de menor longitud, la cantidad de ácido clorhídrico que se produce es mayor.

Se debe tener en cuenta que las cantidades de cloro en cada una de las columnas también varió; en las columnas con mayor longitud la cantidad de gas cloro era mayor y en las columnas con menor longitud la cantidad de gas cloro era menor. Además, se debe considerar que en todos los casos la intensidad en la fuente de luz fue la misma, por lo que se comparaba en teoría la misma cantidad de luz inicial en todos los casos.

Otro aspecto importante que mostraron con este experimento los autores fue la velocidad de la reacción. Para este caso se debe mencionar que esta velocidad de la reacción la midieron en intervalos de tiempo. Lo que propusieron fueron intervalos de tiempo fijos, y una vez pasados estos minutos median la cantidad de ácido clorhídrico que se había producido. La relación entre la cantidad de ácido clorhídrico en estos intervalos de tiempo, lo relacionaron con la velocidad de la reacción.

En todos los casos se observó que la cantidad de ácido clorhídrico que se producía aumentaba no sólo en su cantidad sino en su velocidad, cuando se utiliza menor cantidad de gas cloro. También se hace el análisis de que la luz original que surge desde la fuente de luz tiene unos denominados “rayos químicos” que son invisibles a la vista de las personas, pero que son los responsables de la reacción química. Algunos de estos rayos químicos son absorbidos por el gas cloro y la cantidad de rayos químicos que el cloro permite pasar hacia la reacción, son los que permiten que se produzca la combinación entre los gases hidrógeno y cloro. Por esta razón es que cuando se tiene mayor cantidad de gas cloro como interferente, más cantidad de rayos químicos se absorben por este gas y por ende menor cantidad de rayos químicos llegan a la reacción, por lo que la cantidad total de ácido clorhídrico disminuye y por consiguiente también la velocidad de reacción.

Una vez observado que la cantidad de ácido clorhídrico que se produce es gracias a los rayos químicos que permite pasar la columna con gas cloro, los autores hacen dos montajes en los que ponen 2 columnas con diferentes proporciones de cloro en cada uno de los experimentos. Luego, en uno de los montajes se deja que la luz del sol en un día despejado permita la reacción

entre los gases cloro e hidrógeno y al otro montaje se le permite el acceso a la luz, pero esta vez en un día nublado⁵².

En el caso de estos experimentos se pueden ver los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 7. Rayos químicos utilizados para la producción de ácido clorhídrico en un día soleado y en un día nublado.

W₁	W	h₁	h	1/α₁
20.97	4.46	194.5	21.5	256
19.38	11.17	193.8	65.5	216
16.26	10.26	114.7	60.9	316
12.34	6.73	153.0	58.6	262

Nota: Tomado y modificado de Photo-Chemical Researchers Part III. Bunsen y Roscoe (1857, página 616).

En este punto surge una nueva variable que es W, explicada como la acción química de la luz cuando se realizó la combinación de los gases cloro e hidrógeno. En otras palabras, W serían los rayos químicos que permitieron la reacción entre los dos gases (cloro y hidrógeno).

Para este experimento se utilizan 2 maneras de denominar a las variables W y h⁵³. En primer lugar, se habla de W₁ y h₁ entendidas como los rayos químicos y las longitudes de columna en el primer experimento, es decir, en el experimento en donde la reacción fue sometida ante la luz del sol en un día despejado. Por otro lado, se habla también de W y h entendidas como los rayos químicos y las longitudes de columna en el segundo experimento, es decir, cuando había nubes en el cielo que impedían que los rayos del sol permitieran el contacto directo con la reacción.

Como se pudo ver en la tabla de resultados, cuando se tenían la reacción expuesta directamente en el día despejado se utilizaron columnas con longitudes mucho mayores y aun así la cantidad de rayos químicos que se evidenciaron fueron mayores comparadas con la reacción cuando se desarrolló en un día nublado, que, aunque pusieron columnas de gas con longitudes menores, los rayos químicos que hicieron transformar la sustancia en este caso también disminuyeron⁵⁴.

⁵² La idea con estos dos montajes era que se pudieran comparar diferentes intensidades de luz. El experimento realizado en el día despejado permitía una intensidad de luz solar mucho más fuerte que cuando se realizó el experimento en un día nublado.

⁵³ h es entendida como la longitud de las columnas que contenían al gas cloro que se puso como interferente en las reacciones.

⁵⁴ Es necesario comentar que la cuantificación de los rayos químicos W se hace por medio de la producción de ácido clorhídrico. En este caso, entre más ácido clorhídrico se genere, el valor de W incrementará.

Otro aspecto valioso en este experimento fue que les permitió ver a los autores que en la reacción cuando se alcanzaba una producción constante de ácido clorhídrico, la cantidad de ácido continuaba constante por el tiempo que estuviera expuesta a la luz, siempre y cuando los gases hidrógeno y cloro estuvieran disponibles para la combinación, en otras palabras, si había reactivos disponibles.

Por último, se menciona $1/\alpha_1$ como el ajuste que se hizo en cada uno de los experimentos gracias a la cantidad de rayos químicos que son absorbidos gracias al interferente usado, en este caso, las columnas con cloro gaseoso.

En esta última parte los autores se dieron cuenta que cuando usaban como fuente de luz el sol y luego de haber comparado el experimento en un día nublado versus el experimento en un día despejado, comenzaron a probar si la cantidad de ácido clorhídrico que se producía cambiaba a partir de la hora del día o de la época del año. Esta prueba se realizó, ya que, cuando estaban comparando el experimento en un día nublado y en un día despejado notaron que cuando desarrollaban el experimento en un día soleado pero la hora cambiaba, así estuviera el cielo despejado, la cantidad de ácido clorhídrico que se producía era diferente⁵⁵. Para evaluar la cantidad de ácido clorhídrico que se producía a diferentes horas, se desarrolló la reacción en un mismo día despejado, pero, un experimento se desarrolló con el sol de la mañana como fuente de luz y el otro con el sol de la tarde como fuente. La tabla 8 a continuación muestra los resultados que se obtuvieron:

Tabla 8. Comparación en la producción de ácido usando sol de la mañana y sol de la tarde.

	Exp. 1	Exp. 2
I₀	4.81	6.86
I	1.01	1.60
h	11.8	11.8
P	0.7597	0.7597
T	17.5	17.5

Nota: Tomado y modificado de Photo-Chemical Researchers Part III. Bunsen y Roscoe (1857, página 618).

⁵⁵ Se tiene en cuenta que comparando la cantidad de ácido clorhídrico que se produce cuando estaba haciendo un día despejado versus cuando estaba haciendo un día nublado, era mucho menor la cantidad de ácido que se producía por causa de las nubes. La comparación entre el producto de reacción cuando estaba el día despejado pero cuando la hora cambiaba era menos notoria que cuando se hacía el experimento inicial.

Se debe tener en cuenta que para ambos experimentos se utilizaron columnas con el gas cloro para poder cuantificar la cantidad de rayos químicos que afectan la reacción. De la misma manera las constantes que se relacionan en el experimento son las mismas que ya fueron explicadas en experimentos anteriores: I_0 , la cantidad de rayos químicos que atraviesan sin interferente; I , la cantidad de rayos químicos que atraviesan cuando hay un interferente; h la longitud de la columna de gas cloro; P la presión a la que se encuentra el gas cloro dentro de la columna de vidrio y T la temperatura a la que se encuentra el gas cloro.

Como se pudo notar, la longitud de la columna (h), la presión (P) y la temperatura (T) no cambiaron, lo anterior con el objetivo de ver solamente el cambio en la producción de ácido clorhídrico a causa del sol de la mañana y del sol de la tarde.

En el análisis realizado por los autores muestran que el sol de la mañana generó un poco más de ácido clorhídrico que el sol de la tarde y lo explican proponiendo una idea en la que mencionan que seguramente el sol de la mañana contiene más rayos químicos que el sol de la tarde. Bunsen y Roscoe tienen la idea de que, aunque de manera visual se nota una misma intensidad de luz proveniente del sol, las porciones de luz que no se ven⁵⁶ son diferentes en cada uno de los casos (sol de la mañana y sol de la tarde). Mencionan además que muchas veces en el cielo, gracias a factores como el agua condensada, se observan colores diferentes provenientes de los rayos del sol, y relacionan que esta luz que surge de la fuente original (el sol) debe estar compuesta por varias porciones de luz, entre ellas los rayos químicos responsables de la reacción entre el gas hidrógeno y el gas cloro. Estos rayos químicos que son los responsables de la transformación de las sustancias se pudieron cuantificar gracias a los experimentos que realizaron los autores y también se pudo identificar que cambia la cantidad de rayos que poseen las diferentes fuentes de luz.

Teniendo en cuenta el recorrido experimental que desarrollaron Bunsen y Roscoe (1857) con sus diferentes modificaciones para la determinación de la cantidad de luz que afecta la reacción entre el gas cloro y el gas hidrógeno, se propone a continuación la tabla 9 en la que se recogen las variables que evaluaron y las conclusiones a las que llegan los autores.

⁵⁶ Que han sido denominadas durante todo el texto como rayos químicos

Tabla 9. Resumen de las conclusiones a las que llegan Bunsen y Roscoe durante sus experimentos.

VARIABLE	CONCLUSIONES
Pureza de la mezcla gaseosa (gases hidrógeno y cloro).	La mezcla que se produce después de la electrólisis del ácido clorhídrico es una proporción exacta 1:1 de los gases hidrógeno y cloro, sin oxígeno ni óxidos de cloro.
No reacción en la oscuridad.	La mezcla de los gases hidrógeno y cloro es estable en ausencia de luz, es decir no se genera la combinación para la formación de ácido clorhídrico.
Saturación del agua.	Cuando se satura previamente el agua dentro del sistema con los gases hidrógeno y cloro ya el agua no absorbe más gases y cualquier cambio posterior se debe solamente a la intervención de la luz.
Inducción fotoquímica.	El efecto de la luz sobre la reacción no inicia de manera inmediata cuando es expuesta la reacción a la fuente de luz, sino que aumenta gradualmente hasta estabilizarse.
Temperatura.	El aumento máximo de la temperatura en la reacción solamente cambia aproximadamente en 0.2°C , por lo que el calor no explica que se produzca la reacción de combinación de los gases, sino que es puramente por consecuencia de la luz.
Presión atmosférica y presión del gas.	Por medio de los manómetros y reguladores de presión se hace que la presión se mantenga constante para que no interfiera en la medición del volumen del producto de reacción.
Fuente de luz.	Se muestra que la acción química depende de la intensidad de la luz que reciba la reacción química, por lo que se propone un tamaño de llama estándar para reproducir los experimentos posteriores.
Tiempos de exposición.	La reacción de combinación de los gases hidrógeno y cloro se detiene casi inmediatamente cuando se le retira la fuente de luz, por lo que se puede hablar de que no hay continuación de la reacción una vez se detiene la exposición.
Longitud de las láminas de vidrio, transparencia y reflexión.	La longitud de las láminas de vidrio y su transparencia afectan la cantidad de luz que atraviesa el material, además la luz sufre pérdidas por reflexión y absorción de los materiales, por lo que se hacen correcciones usando el coeficiente de transmisión.
Vidrios oscuros Vs vidrios claros.	Los vidrios claros son mejores para los experimentos, ya que transmiten mejor los rayos químicos. Los vidrios oscuros absorben más luz, lo que reduce la acción química.

Múltiples láminas de vidrio puestas como interferente.	Se usan diferentes cantidades de láminas de vidrio con el objetivo de calcular el coeficiente de transmisión, considerando las reflexiones múltiples y las absorciones internas.
Columna de agua con interferente.	Se comprueba que el agua no absorbe de manera significativa los rayos químicos, por lo que el solvente en el que se encuentran los gases no afecta los resultados.
Soluciones de tinta roja a distintas concentraciones.	Se demuestra que la absorción de rayos químicos que se genera por parte de las soluciones rojas es proporcional a la concentración de la solución, es decir, entre más concentración más rayos químicos se absorben también.
Gas cloro como interferente de la reacción.	El gas cloro llega a absorber rayos químicos en la reacción cuando se usa como interferente y de la misma manera que en las soluciones rojas, entre más concentración hay de cloro, más cantidad de rayos químicos son absorbidos.
Gases atmosféricos como interferentes.	Se demuestra que gases atmosféricos como el oxígeno y el nitrógeno no afectan a los rayos químicos, por lo que suponen que los gases deben tener un tono para que los rayos sean absorbidos, por ende, el aire en los experimentos no se considera interferente.
Variación en la velocidad de reacción.	La medición en distintos tiempos de reacción demuestra que la reacción tiene una velocidad constante siempre y cuando se tengan reactivos presentes en los tubos de reacción.
Comparación entre la luz del sol en un día despejado y en un día nublado.	En los días despejados los rayos químicos llegan con mayor facilidad que en los días nublados, además en las horas de la mañana de los días soleados se genera mayor producto de reacción, ya que los rayos del sol de las mañanas contienen más cantidad de rayos químicos.

Nota: Creación original del autor, basada en Photo-Chemical Researchers Part I, Part II y Part III. Bunsen y Roscoe (1857).

Como se pudo ver en este recorrido realizado con ayuda de Bunsen y Roscoe (1857), sus experimentos constituyen de los primeros esfuerzos por comprender las reacciones químicas en donde la luz está involucrada. Los cuidados en las metodologías utilizadas y el control realizado a las variables que utilizaron, como la temperatura, la presión, el tipo de vidrio y las demás variables que se mencionan en la tabla 9, permite que se pudiera relacionar la reacción entre los gases hidrógeno y cloro para la formación de ácido clorhídrico, en donde se comprobó que en la oscuridad no ocurre, sino que debe haber presencia de la luz para que se genere una acción química. Con lo

anterior, Bunsen y Roscoe (1857) trabajaron en un campo investigativo en el que se mostró que la energía luminosa puede desencadenar transformaciones químicas sin que el calor sea el protagonista en las mismas.

Este campo investigativo en el que Bunsen y Roscoe (1857) trabajaron es fundamental para la investigación de la que se está hablando en este escrito, ya que las reacciones que ocurren en el papel fotográfico dentro de la cámara estenopeica se transforman químicamente bajo el mismo principio. Para nuestro caso, la luz también tiene un papel protagónico, ya que permite que los haluros de plata⁵⁷ se transformen en plata metálica y el halógeno libre. Y así como Bunsen y Roscoe (1857) usan a la luz en sus experimentos para la obtención de ácido clorhídrico, para el caso de la cámara estenopeica la luz va a permitir que se evidencie una imagen por medio de una reacción de óxido - reducción inducida por la luz.

El análisis histórico de estos documentos me permite reconocer que los fenómenos no se presentan como hechos aislados, es decir, el llegar a la fotografía en las cámaras estenopeicas no se dio de un día para el otro, sino que estas organizaciones se construyen de manera intencional y se construyen los fenómenos por medio de la formalización de los procesos que se observan. Bunsen y Roscoe (1857) no se quedaron con la medición de los efectos, sino que fueron aislando las variables que podían afectar sus estudios y además creando condiciones experimentales precisas que les ayudó a detectar las posibles interferencias y distinguir las causas tanto físicas como químicas para darle sentido al fenómeno que estaban investigando. Este es un claro ejemplo de la transición de la observación empírica y cómo a partir de estas observaciones se puede llegar a la construcción conceptual de un fenómeno en este caso del fenómeno fotoquímico.

Un aporte valioso en mi labor docente es el papel del experimento en el aula, el comprender cómo los investigadores llegan a construir las teorías por medio de sus experiencias, me permite valorar el experimento no como una simple validación de teorías, sino más bien, como la posibilidad de brindarle a mis estudiantes un espacio de pensamiento en donde puedan organizar sus experiencias, reconocer las posibles relaciones que se generan entre las variables y construir sus propias explicaciones sobre lo que están observando. Para el caso de la cámara estenopeica, el objetivo estará relacionado con que se puedan llegar a ver los efectos de la luz sobre el papel fotográfico, y de la misma manera como lo hicieron Bunsen y Roscoe (1857), se pueda hacer una

⁵⁷ Presentes en el papel fotográfico y que pueden llegar a ser bromuro de plata o cloruro de plata según el tipo de papel con el que se esté trabajando.

selección de variables, como los tiempos de exposición, las longitudes de onda o las distancias, para poder comprender la dinámica detrás de la toma de una fotografía, en donde se logre ver el efecto de la luz sobre el papel fotográfico.

Así, la lectura de los textos de Bunsen y Roscoe (1857) no solo aporta elementos históricos o científicos al trabajo que estoy realizando, sino que, será el hilo conductor más fuerte para la construcción de la ruta metodológica⁵⁸ orientadora para el trabajo en el aula de clase. En esta ruta metodológica se pretende abarcar la observación, la manipulación y la reflexión en torno a los fenómenos que comprenden a la luz como la responsable de la transformación química.

La comprensión de los fenómenos fotoquímicos vistos y estudiados en los textos de Bunsen y Roscoe (1857), abren la posibilidad de profundizar en los aspectos ligados a la transformación de las sustancias que se ven relacionadas a los procesos a partir de la interacción de la luz. En este punto resulta útil involucrar a Antoine Lavoisier, específicamente en su texto denominado Tratado elemental de química (1789), quien históricamente es uno de los primeros en hablar de los óxidos y las correspondientes oxidaciones⁵⁹, además de mencionar el papel de los reactivos, de los productos y la conservación de la masa en sus aportes. Comenzar a hablar de Lavoisier en este punto permite hacer una transición desde los análisis experimentales de la acción de la luz en las reacciones, específicamente la reacción de los haluros de plata por causa de la luz, hasta comenzar a hablar de manera más rigurosa de los procesos de combinación, descomposición y cambios químicos que se ven reflejados en el papel fotográfico. Desde este punto de vista, combinar los diálogos de Bunsen y Roscoe con los de Lavoisier permite reconocer la naturaleza de las reacciones de óxido - reducción implicadas en la transformación del papel fotográfico por causa de la luz, y además permite situar un marco histórico en donde se logre combinar la ciencia detrás de una reacción química, incluyendo un factor como la luz como agente transformador de la materia.

⁵⁸ Esta ruta metodológica se puede encontrar más adelante en el texto bajo el nombre de: De los rayos químicos a la fotografía: una ruta metodológica con papel sensible a la luz.

⁵⁹ Siendo las reacciones de óxido - reducción las que están implicadas en la transformación de las sustancias por causa de la luz, se da valor al estudio de los textos de Lavoisier como punto de partida a la hora de hablar de reacciones químicas.

7. DE LA CALCINACIÓN A LA LUZ: ALGUNAS VISIONES DE LA OXIDACIÓN Y LA REDUCCIÓN

Una vez determinadas las transformaciones que se pueden llevar a cabo por causa de la luz según los textos traídos a este escrito de Bunsen y Roscoe (1857), se va a ser un recuento sobre el origen de las reacciones que se ven relacionadas en la investigación, concretamente reacciones de oxido - reducción. Para cumplir este objetivo, se iniciará con la intervención del texto de Lavoisier denominado “El tratado elemental de química” de 1789.

7.1. La ruptura y el paso del flogisto al oxígeno

Se debe considerar que, a finales del siglo XVIII, Antoine Lavoisier llevó a cabo una serie de experimentos que marcaron la historia de la química, y que fueron la transición del flogisto a la química que conocemos hoy en día. En su Tratado elemental de química (1789), Lavoisier puso en duda la transformación de las sustancias por las explicaciones dadas en la época, que eran relacionadas con la ganancia o la pérdida de una sustancia inmaterial que denominaban “flogisto”⁶⁰.

Mediante rigurosos experimentos de combustión y calcinación, Lavoisier logró controlar los pesos de los reactivos y de los productos en las diferentes transformaciones demostrando un aumento de masa en los metales al ser calentados. Lavoisier explicó este aumento de peso gracias a la combinación del metal con una parte del aire, más adelante denominado oxígeno, y no por una pérdida o ganancia de flogisto que era la explicación que se daba en la época.

Los experimentos diseñados por Lavoisier transformaron no solo la forma de entender la combustión, sino la forma de entender el fuego como sustancia. Estas actividades experimentales de Lavoisier sentaron las bases para el concepto de la oxidación que conocemos en la actualidad, entendido como la unión de un cuerpo con el oxígeno. El aire dejó de ser un elemento invisible e indivisible y se transformó en una sustancia activa para el funcionamiento de una reacción química.

⁶⁰ Cabe mencionar que esta ganancia y pérdida del “algo” sigue siendo la explicación a la transformación de las sustancias, pero esta vez el denominado flogisto cambió por el término de electrón cuando se habla de reacciones de óxido - reducción. Eso sí, explicando esta definición como la concepción matemática de lo que ocurre en las sustancias cuando se transforman.

Tabla 10. Comparación entre la teoría del flogisto y las nuevas afirmaciones de Lavoisier.

ASPECTO	TEORÍA DEL FLOGISTO	PROPUESTA DE LAVOISIER
Explicación del fuego	Liberación del flogisto contenido en los cuerpos.	Combinación del oxígeno con el cuerpo que se calcina.
Cambio de peso	El cuerpo pierde flogisto, por lo que pierde el peso que tenía antes.	El cuerpo gana oxígeno del aire por lo que aumenta la masa.
Naturaleza del aire	Medio pasivo, es decir que no se tiene en cuenta en las reacciones.	Mezcla de gases, entre los gases que contiene esta el oxígeno.
Producto de la calcinación	Cenizas sin propiedades específicas.	Óxidos metálicos con propiedades definidas, diferentes a las propiedades del metal original.
Método experimental	Observaciones cualitativas.	Observaciones cuantitativas, con mediciones precisas de masas y gases que se producen.

Nota: Creación original del autor, basada en el Tratado elemental de química de Lavoisier (1789).

En la anterior tabla se intenta mostrar una comparación entre las afirmaciones que se hacían durante la teoría del flogisto y las nuevas afirmaciones que realizó Lavoisier para explicar algunos aspectos que me parecieron los más relevantes a la hora de hacer la transición en las teorías científicas.

7.2. Experimentos más relevantes que desarrolló Lavoisier

Lavoisier (1789) desarrolló un conjunto de experimentos que desde mi punto de vista resultaron ser claves para la comprensión que hoy en día tenemos de una reacción química. El interés de Lavoisier inicialmente era proponer experimentos que dieran una mejor explicación a la establecida hasta este momento, es decir, a la teoría del flogisto. Estos experimentos consistieron en pesar cuidadosamente los reactivos y luego los productos de reacción, generar un control más preciso de la cantidad de aire que se involucra en el sistema y cerrar los sistemas de reacción para evitar la reacción con terceros o la pérdida de producto de reacción.

A continuación, se presenta una tabla en la que expongo algunos de los experimentos clave que dieron origen a los conceptos modernos de oxidación y reducción:

Tabla 11. Experimentos principales de Lavoisier sobre la oxidación de la reducción (revivificación)

EXPERIMENTO	SUSTANCIAS INVOLUCRADAS	OBSERVACIONES	INTERPRETACIONES DE LAVOISIER	INTERPRETACIÓN ACTUAL
Calcinación del estaño y del plomo	Metal. Aire.	Al momento de hacer las mediciones se notaba un aumento de peso en la nueva sustancia y una disminución en el volumen del aire.	El aire que se encuentra dentro del sistema penetra al metal y se forma una sustancia nueva llamada cal.	Es una típica oxidación, es decir la formación de un óxido metálico.
Descomposición del óxido de mercurio	Óxido de mercurio. Mercurio. Gases.	Se evidenciaba la liberación de un gas que era favorable a la combustión.	El óxido devuelve la vida al metal (Lavoisier denominó este cambio como revivificación).	Actualmente se denomina reducción, en este ejemplo se libera oxígeno y el mercurio.
Calcinación de hierro y de mercurio	Hierro. Mercurio. Aire.	Al comparar la calcinación de ambos metales, se podía ver que había una diferencia en la rapidez de oxidación de ellos.	Aunque ambos metales están pasando por el mismo proceso, es decir, una calcinación, tiene una afinidad diferente por el aire (oxígeno), por esta razón la reacción cambia su rapidez.	Se generan diferentes potenciales de óxido – reducción.
Reducción del óxido con carbono	Óxido metálico. Carbono.	Se observaba que había la formación de un gas (más adelante denominado ácido carbónico).	El carbón es una sustancia capaz de liberar al metal.	Es una reacción de óxido – reducción, en donde el carbono se oxida y el metal se reduce.

Nota: Creación original del autor, basado en el Tratado elemental de química de Lavoisier y de Holmes (1985) en su obra Lavoisier and Chemistry of Life: An Exploration of Scientific Creativity.

En la tabla anterior se recogen, como ya se había mencionado, algunos de los experimentos que desde mi punto de vista fueron clave a la hora de que se generará el cambio de pensamiento en la época del flogisto. En la tabla se pueden encontrar los experimentos, las sustancias involucradas, las observaciones que se podían hacer por parte de los experimentadores y la interpretación de

Lavoisier en términos de un pensamiento diferente al del flogisto. Por último, también se aprecia la interpretación de lo que estaba pasando en los experimentos si buscáramos en los libros actuales.

7.3. La oxidación como proceso de combinación

En el capítulo VII del Tratado elemental de química (1789), Lavoisier describe los experimentos en los que metales como el hierro y el mercurio al calcinarse en presencia de aire generan sustancias aparentemente nuevas que al ser pesadas por el experimentador observa que tiene pesos mayores⁶¹. Estas nuevas sustancias en los textos de Lavoisier se denominaron sales metálicas, lo que actualmente conocemos como los óxidos.

El aumento de peso fue un argumento clave para poder entender que los metales debían ganar peso a partir de alguna otra sustancia, en ese momento explicado por causa del aire⁶². Teniendo en cuenta estas observaciones, Lavoisier noto que el tiempo de calcinación también generaba sustancias diferentes, por lo que propuso una clasificación de estas sales metálicas, mediante los grados de oxigenación⁶³. Los grados de oxigenación propuestos por Lavoisier se encuentran a continuación:

Tabla 12. Grados de oxigenación de los metales según la clasificación realizada por Lavoisier.

GRADO DE OXIGENACIÓN	PRODUCTO GENERADO	TERMINOLOGÍA PROPUESTA POR LAVOISIER
Primer grado	Cales metálicas (óxidos metálicos)	Óxidos
Segundo grado	Ácidos menos oxigenados	Ácidos terminados en “oso”
Tercer grado	Ácidos más oxigenados	Ácidos terminados en “ico”
Cuarto grado	Ácidos con oxígeno	Ácidos terminados en “ico”

⁶¹ Este experimento y otros de los más relevantes aparecen dentro de la tabla 11 con una interpretación del autor y actual que pueda ser más específica.

⁶² Y para el caso de Lavoisier, entendido ese aire como una mezcla de gases, en donde el responsable de la reacción sería el denominado por él: oxígeno.

⁶³ Estos grados de oxigenación es lo que se considera hoy en día como los diferentes estados de oxidación que presentan los elementos, pero en esa época Lavoisier lo clasificaba de esta manera, ya que notaba que entre más tiempo duraba la calcinación de los metales, los colores de las nuevas sustancias eran diferentes y necesitaba tener una forma de diferenciar a cada sustancia.

	adicional	oxigenado”
--	-----------	------------

Nota: Creación original del autor, basado en el Tratado elemental de química de Lavoisier capítulo VII (1789).

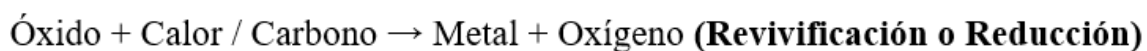
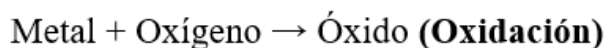
7.4. La revivificación de los metales: el origen del término reducción actual

Lavoisier (1789) utilizó el término revivificación para explicar el proceso contrario a la oxidación, es decir, en la revivificación el óxido metálico se descompone en oxígeno y el metal. El término de revivificación era usado, ya que intentaba mostrar que el metal que se convirtió en óxido metálico por causa del oxígeno del aire (oxidación), volvió a sus orígenes, es decir, el metal puro de nuevo, en otras palabras, revive de nuevo en su forma original, una definición de tipo animista⁶⁴.

Lavoisier (1789) en sus experimentos calentaba los óxidos, siendo específicos, los óxidos de mercurios, que fueron los que más utilizó en sus experimentos, y en presencia de carbono se podía observar la liberación de oxígeno y la recuperación del metal original, para el ejemplo el mercurio original. En este proceso se podía observar como la afinidad inicial que tenía el metal por el oxígeno se rompía por causa de la temperatura, en otras palabras, la temperatura disminuye la afinidad entre el oxígeno y el metal y por esta razón se permite que el metal reviva y pueda volver a su estado inicial.

Este proceso de la revivificación se puede interpretar como el concepto de reducción actual, en donde formalmente cuando con el óxido del metal se forma de nuevo al metal, se definiría como una reducción en los lenguajes actuales. Lavoisier en su momento, y ayudándose de lenguajes animistas, lo definió como el volver a dar vida al metal que había sido muerto en forma de óxido (revivificación).

Imagen 5. Esquema experimental usado por Lavoisier para explicar la oxidación y la reducción.



Nota: Elaboración propia tomado a partir del texto Tratado Elemental de Química de Lavoisier (1789).

⁶⁴ Cuando se menciona el concepto como animista, debemos mencionar los textos de Bachelard, específicamente el texto denominado: “La formación del espíritu científico”; en donde se menciona que el lenguaje animista usa metáforas vitalistas en donde se le atribuyen intenciones, deseos o cualidades vitales a los fenómenos naturales.

7.5. La luz como un agente químico capaz de romper afinidades químicas

Con el objetivo de conectar los trabajos de Bunsen y Roscoe con los experimentos realizados por Lavoisier, cabe destacar que Bunsen y Roscoe retomaron la relación entre la energía y la materia⁶⁵, pero en esta ocasión no hablando de la temperatura sino hablando de la luz. En su investigación sobre las reacciones fotoquímicas, Bunsen y Roscoe demostraron como los rayos de luz provenientes del sol y de diferentes fuentes de luz, provocan reacciones parecidas a las que realizó Lavoisier, pero usando los cambios de temperatura, aunque con mecanismos de reacción diferentes.

Estas investigaciones amplían el sentido de la oxidación y la reducción más allá de la intervención del oxígeno en las reacciones químicas, ya no depende exclusivamente del fuego o del calor que se genere un cambio químico, sino que la energía luminosa también tiene la posibilidad de alterar los estados químicos de la materia.

Con el objetivo de intentar hacer una comparación entre los textos de Bunsen y Roscoe con los trabajos de Lavoisier, se construyó la tabla a continuación en donde se pueden encontrar algunos aspectos importantes para esta investigación con respecto a las conclusiones de cada uno de los textos revisados.

Tabla 13. Paralelo entre los textos de Bunsen y Roscoe y las observaciones de Lavoisier.

ASPECTO	LAVOISIER (1789)	BUNSEN Y ROSCOE (1855 - 1862)
Fuente de energía	Calor	Luz
Tipo de reacción	Oxidación y revivificación	Reacciones fotoquímicas
Sustancias estudiadas	Metales y sus óxidos	Gases (Cloro e Hidrógeno)
Método experimental	Se controlan las masas y los volúmenes de los gases	Medición del producto de reacción para comparar las intensidades luminosas
Conceptos clave	Afinidad química	Acción química de la luz

Nota: Creación original del autor, basado en el Tratado elemental de química de Lavoisier y de Photo-Chemical Researchers Part I, Part II y Part III de Bunsen y Roscoe.

⁶⁵ Cuando se menciona que retomaron, se refiere a que Lavoisier hablaba de cómo la temperatura rompía las afinidades entre el oxígeno y el metal, es decir, permite una reacción química. Para el caso de Bunsen y Roscoe, lo que permite que se genere la transformación será la luz.

Como se puede apreciar en la anterior tabla, la línea que une a los experimentos realizados por Lavoisier con los experimentos realizados por Bunsen y Roscoe es la transformación de la energía, como forma general para que se genere un cambio químico. Lavoisier mostró cómo el calor podía modificar las afinidades de los cuerpos (haciendo que el metal y el oxígeno se separaran), Bunsen y Roscoe demostraron que la luz podía generar los mismos efectos que el calor (en términos de transformación de las sustancias). En ambos casos la materia reacciona ante una forma de energía (aunque diferente) que logra alterar su composición.

Este seguimiento a través de la historia de cómo han estudiado los fenómenos de la transformación de sustancias desemboca en el objetivo de esta investigación, sobre la oxidación y reducción de los haluros de plata presentes en el papel fotográfico. Para este caso la luz al reaccionar con los haluros de plata genera una transformación en esta sustancia haciendo que la plata cambie a plata metálica, o en términos de Lavoisier, se genere la revivificación de la plata.

La transición de las sales metálicas de Lavoisier hasta los haluros de plata presentes en el papel fotográfico evidencia cómo el concepto de la oxidación y de la reducción evolucionó desde las diferentes interpretaciones térmicas y materialistas hasta una interpretación más adelante en términos energéticos y lumínicos. Para Lavoisier y Bunsen y Roscoe el experimento fue el punto de encuentro entre la medición, la observación y la interpretación, en donde la materia fue el actor central, gracias a su transformación constante, integrando en cada uno de los casos tanto al fuego como a la luz.

Ahora bien, observando los experimentos realizados por Lavoisier sobre la calcinación, la revivificación y la formación de óxidos metálicos, debemos hablar de los autores en los que él se basó para hacer los montajes experimentales, por lo que las obras de Robert Boyle resultan tener una importancia significativa, no solo para Lavoisier sino para esta propia investigación. En su obra *The Experimental History of Colours* de 1664, Boyle había descrito con mucho detalle cómo las sustancias cambian de color al ser expuestas al aire, al fuego o al contacto con diferentes reactivos, en donde el color era una propiedad fija de la materia y cuando se observaba un cambio, indicaba la transformación de esta. Estos experimentos realizados por Boyle, como la decoloración de las soluciones metálicas o los cambios cromáticos inducidos por el calor, fueron una base valiosa para que Lavoisier considerara el cambio de color como un signo visible de la transformación de las sustancias, especialmente los metales con oxígeno. Cabe resaltar, que, aunque no se mencionó

a profundidad en los apartados anteriores, Lavoisier basándose en los colores, logró clasificar a los óxidos según sus tonalidades, como el plomo rojo, plomo amarillo o hierro negro, incentivando la tradición experimental de Boyle, en donde el color era la huella que indicaba un cambio químico. Esta continuidad que se quiere desarrollar en este apartado sobre los trabajos de Boyle tiene una especial importancia cuando lo trasladamos al campo de la fotoquímica, en donde la reacción de los haluros de plata en el papel fotográfico se hace visible precisamente por medio de las variaciones de color en el papel⁶⁶. De esta manera los cambios cromáticos vistos por Boyle en sus experimentos e interpretados por Lavoisier como signo de oxidación o reducción, se quieren indagar con más detenimiento, ya que en la cámara estenopeica serán una forma de leer la transformación de la materia a través de la luz.

8. LOS ATRIBUTOS DEL COLOR Y LA RELACIÓN ENTRE LA MATERIA Y LA LUZ

Durante el siglo XVII, Boyle investigó sobre algunas de las propiedades de las sustancias, entre ellas, el color. Boyle quería determinar si el color era una propiedad intrínseca de los cuerpos o si dependía de la interacción entre la luz y la materia. En su libro titulado *The Experimental History of Colours* publicado en 1664 destaca algunos de los experimentos realizados, en los que relaciona la composición de los cuerpos con la percepción del color en cada uno de ellos.

En esta obra Boyle (1664) menciona que el color no se debe entender como una cualidad fija de los cuerpos, sino que es la manifestación visible de los cambios que se presentan en la materia. Además, incluye, que estos cambios de color en los materiales se deben a la interacción de los materiales con agentes externos como el fuego, los reactivos químicos o la luz. En este sentido, Boyle infiere que el cambio de color en las sustancias corresponde a la transformación de estas. Esta afirmación anterior a Lavoisier es la que ayuda a que los experimentos de oxidación y revivificación se interpreten de la manera como se realizan y se lleguen a las conclusiones que se llegan, con respecto a los óxidos y sus propiedades.

Boyle en su búsqueda por encontrar la naturaleza del color realizó un conjunto de experimentos en donde utilizó materiales vegetales, minerales y metales con el objetivo de hacer

⁶⁶ En este caso las variaciones de color, irán desde el negro hasta las distintas tonalidades de los grises y blancos.

comparaciones entre los cambios que se generan. Boyle (1664) observó que muchos de los cambios que se podían presenciar en las sustancias se debían a transformaciones de tipo química, lo que nosotros hoy en día denominamos reacciones químicas, pero que durante su época no se maneja como concepto. Además, se dio cuenta que estas transformaciones se podían manipular o controlar alterando las condiciones como la acidez, el calor o la luz.

Y con el objetivo de presentar en esta investigación los experimentos más influyentes para los temas que se están tratando en el escrito, se presenta a continuación la siguiente tabla con una especie de resumen de las observaciones de Boyle:

Tabla 14. Experimentos de Boyle sobre los cambios de color de las sustancias.

EXPERIMENTOS	CONDICIONES	OBSERVACIONES	INTERPRETACIÓN DE BOYLE	INTERPRETACIÓN ACTUAL
Calentamiento del plomo	Plomo expuesto al fuego durante diferentes tiempos de reacción.	El plomo que originalmente es gris y brillante se vuelve amarillo o rojo según el tiempo de calentamiento.	El color indica una alteración interna que se genera en el cuerpo.	Se forman óxidos de plomo (monóxido de plomo y tetraóxido de triplomo).
Reacciones del cobre con ácidos y álcalis	Cobre disuelto en ácidos y álcalis.	El cobre cambia de color a azul o verde según el tipo de sustancia (ácido o álcali).	El color al que cambia el cobre depende de la disposición del cobre al momento de la reacción y del agente que se utilice (ácido o álcali).	Se forman sales como sulfatos o carbonatos de cobre.
Combinación de azufre con metales	Azufre fundido con diferentes metales.	Se generan colores según el metal con el que se funde: hierro (oscuro), cobre (negro azulado), plomo (gris), mercurio (rojo), antimonio (naranja), etc.	Los colores dependen de la transformación que se presenta por la mezcla con los diferentes metales y la acción del fuego.	Se forman sulfuros del metal que se utilice.
Extractos vegetales y reactivos ácidos y básicos	Extractos de plantas sometidos a diferentes ácidos y	Se generan cambios de colores según el tipo de extracto y la	El color depende de la naturaleza del disolvente (ácido o	El extracto es un indicador ácido - base que indica la

	bases (álcalis).	sustancia con la que reacciona (ácido o base).	base) y la luz.	naturaleza del agente utilizado (ácido o base).
--	------------------	--	-----------------	---

Nota: Creación original del autor, basado en The Experimental History Of Colours de Boyle (1664).

Como se pudo ver en la tabla anterior, se tienen diferentes observaciones realizadas por Boyle, sus correspondientes interpretaciones y además se propone la interpretación actual de las reacciones que ejecutó el experimentador en el siglo XVII.

8.1. El color como signo de transformación

Como se menciona en el apartado anterior, Boyle (1664) afirma que el cambio de color es un signo de que se generó la transformación de una sustancia. Y de la misma manera, en la actualidad se puede decir que en los procesos que reconocemos como oxidación y reducción también hay una huella que se evidencia por causa del color en donde logra diferenciar los procesos (en algunas reacciones).

Sin nombrarlo de la misma manera, Boyle (1664) mencionaba que había procesos en donde los metales se combinaban o perdían parte de su principio aéreo o sulfurado, lo que más adelante Lavoisier re-interpretaría como las combinaciones o descomposiciones en donde el oxígeno era el actor principal. Esta cercanía entre las interpretaciones es de gran importancia, ya que Lavoisier se basó en muchas de las conclusiones de Boyle para desarrollar sus montajes y sacar sus posteriores conclusiones. La cercanía entre los experimentos de Boyle y Lavoisier era tanta, que su insistencia por la medición de las condiciones experimentales, como los tiempos de calentamiento, las intensidades de la luz o las proporciones entre los reactivos y los productos, es lo que ha generado una actualización y cambio de pensamiento en la química moderna. Lavoisier siglos después de las publicaciones de Boyle se apoyaba en las observaciones de los cambios de colores de Boyle para explicar los diferentes grados de oxigenación que se generaban en los metales al calcinarlos y además mencionar que estos cambios cromáticos podían indicar afinidad química o no, entre el metal y el oxígeno.

8.2. La luz como agente experimental

Uno de los aportes más importantes de Boyle (1664) para esta investigación fue su exploración del papel de la luz en los cambios químicos y las transformaciones de los colores. En

algunas de sus observaciones, noto que la intensidad luminosa que utilizaba modificaba los tonos observados en los metales y en los extractos vegetales que se comparaban. Boyle experimentó con filtros, sombras y exposiciones con diferentes tiempos y concluyó que la luz podía avivar, alterar o desvanecer los colores según su intensidad y la dirección en la que apuntaba a las sustancias.

Estas ideas sobre la luz anticipan un poco la idea de los efectos de la luz sobre la materia que se mencionó más adelante en la historia y se demostró experimentalmente como ya se mostró en apartados anteriores por parte de Bunsen y Roscoe.

La relación entre Boyle y Lavoisier no se reduce a una continuidad cronológica entre ambos autores, sino que lo significativo será que ambos entienden la observación como un medio para entender la transformación de la materia. Con Boyle el color revela la interacción entre las sustancias y la luz, mientras que, en Lavoisier, el color se vuelve la evidencia empírica de las reacciones de oxidación y reducción y por último en la fotoquímica, el color es la manifestación visual de la reducción de los haluros de plata por la acción luminosa.

La evolución del color que se percibe, al color que se produce químicamente, genera una transición entre las observaciones sensoriales y la interpretación energética⁶⁷. En el revelado del papel fotográfico el recorrido que se ha propuesto hasta este momento se concreta de manera experimental, ya que la luz provoca la reducción de los haluros de plata a plata metálica originando tonalidades grises, negras y blancas que configuran la imagen final. En cierto modo, el revelado del papel fotográfico será el heredero de los experimentos de Boyle, en donde los cambios de color eran signo de que la materia se transformaba por causa de la luz.

A lo largo del relato en esta investigación el estudio de los cambios de color, las transformaciones de los metales y la acción de la luz sobre la materia han estado entrelazados gracias al revelado del papel fotográfico. En Boyle se habló de cómo el color es un signo de la transformación de las sustancias; con Lavoisier, la variación de los colores en los metales calcinados generó una evidencia empírica de la combinación del metal con el oxígeno y de la posibilidad de la revivificación posterior del metal; en Bunsen y Roscoe, la luz se convirtió en una fuente de energía capaz de generar reacciones químicas, complementando las ideas de las

⁶⁷ Lo que se quiere decir en este caso, es que los cambios de color en el papel fotográfico ya no van a ser un simple cambio de color como algo natural del papel, sino que, el cambio de color se va a llevar a generar de manera que produzca el efecto que se espera, es decir, una imagen latente en la fotográfica, teniendo en cuenta tiempos de reacción, intensidades de luz y demás características que permitan generar una interpretación energética.

reacciones fotoquímicas. Sin embargo, al examinar de nuevo el término de revivificación utilizado por Lavoisier surge la pregunta de ¿qué significa exactamente revivificar un metal o reducir un metal para Lavoisier? ¿Es devolverlo a su estado original o es purificarlo o liberarlo de impurezas que lo acompañan desde la naturaleza? En este punto es útil mencionar el texto *De Re Metallica* escrito por Georgius Agricola, escrito en 1556, en donde se mencionan procesos de purificación, calcinación y refinación de metales por primera vez, en uno de los textos más antiguos que mencionan detalles sobre estos temas, aun cuando no se hablaba ni siquiera la palabra química. Se debe tener en cuenta que este es uno de los libros más importantes en la química aun cuando no es de química, ya que era un libro de minería, muy similar a un manual para mineros de cómo extraer metales de los minerales presentes en el suelo.

9. LA PURIFICACIÓN DE LOS METALES EN *DE RE METALLICA* Y SU RELACIÓN CON LA REVIVIFICACIÓN DE LAVOISIER

En el texto *De Re Metallica* publicado por Georgius Agrícola en el año 1556, se constituye como uno de los tratados más específicos en donde se trataron temas como la extracción, la refinación y la purificación de los metales en el renacimiento de Europa. Aunque este no es un texto de química formalmente, sí aportó información relevante para los fenómenos que implican a las características de los metales. En este texto se muestra como Agrícola a diferencia de los alquimistas de la época, no buscaba la transmutación de los metales, sino que se preocupaba en la transformación técnica de los minerales encontrados en el suelo en los metales correspondientes. En su obra, Agrícola ayudado de esquemas muy completos, muestra los hornos, los fuelles, crisoles y todos los instrumentos especializados en su trabajo para el óptimo proceso de tratamiento de los minerales. Este texto contribuyó en su momento a los mineros de la época, y en nuestros días contribuye al conocimiento de la química experimental.

En los escritos de Agrícola (1556) se comprende una relación simbólica con las apreciaciones de Lavoisier sobre la revivificación, ya que en ambos casos se menciona el metal en su estado puro a partir de otras sustancias. Para el caso de Agrícola, el metal se obtenía desde los minerales presentes en el suelo por medio de los hornos mientras que para Lavoisier el metal se obtenía a partir de los óxidos, pero en este caso dentro de los laboratorios a través de los experimentos realizados.

9.1. Los experimentos metalúrgicos de Agrícola

En su texto Agrícola (1556) describe procedimientos para separar el metal de la ganga⁶⁸ y obtenerlo en su estado más puro. El método usado por Agrícola consistía en la observación empírica, la manipulación controlada del fuego y el uso de reactivos naturales. En la tabla que se presenta a continuación, se muestran de manera sintética los procesos más representativos desarrollados:

Tabla 15. Procesos metalúrgicos que se describen en *De Re Metallica* de Agrícola.

ETAPA	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO	PROPÓSITO	INTERPRETACIÓN Y CORRESPONDENCIA EN LA QUÍMICA MODERNA
Exploración y selección del mineral	Se toman pequeñas muestras de suelo de lugares donde se quería averiguar si había presencia de algún metal que se quisiera extraer y se fundía a baja escala para identificar su presencia y concentración.	Determinar la riqueza del metal en el sitio y evitar extracciones improductivas con posibles pérdidas de dinero.	Se realizaba un ensayo metalúrgico en el que se hacía un análisis preliminar del contenido metálico en el suelo.
Trituración y lavado	Se molía el mineral extraído ⁶⁹ y se lavaba con agua para separar las partes pesadas (metales) de las partes ligeras (gangas).	Aumentar la pureza del material antes de ser fundido.	Se realizaba una separación física por densidad de las sustancias.
Fusión o fundición	Se colocaban los minerales triturados y lavados dentro de crisoles y se calentaban dentro de hornos diseñados para soportar altas temperaturas, que eran alimentados por fuelles. Además, a los minerales se le añadían fundentes ⁷⁰ (bórax,	Separar el metal de sus combinaciones que vienen de los minerales extraídos.	Se hacía una reducción por las altas temperaturas de los óxidos o sulfuros metálicos presentes en los minerales extraídos.

⁶⁸ La ganga era la definición que tenían en la época de Agrícola para definir la parte no metálica o las impurezas que extraían con los minerales del suelo.

⁶⁹ En dado caso que las muestras de suelo estudiadas en el paso de la exploración y selección del mineral indican que ese suelo tenía buenas cantidades del metal que querían extraer y la concentración deseada sí se procede a continuar el proceso, de lo contrario se seguían buscando mejores lugares.

⁷⁰ Los fundentes eran sustancias que permitían que la temperatura fuera mucho más alta sin que se requiriera de una fuente de calor adicional.

	sal, cal, etc) para facilitar la fusión.		
Refinación	Una vez obtenido el trozo de metal, se procedía a calentar de nuevo, con el objetivo de eliminar impurezas. Agrícola mencionaba que si se le añadía plomo o sal se atraían los residuos no metálicos.	Aumentar la pureza del metal fundido.	Se estaba desarrollando una purificación por oxidación selectiva.
Cementación y amalgamación	Solamente cuando se estaba extrayendo metales preciosos como el oro o la plata se usaban reactivos como el mercurio o el vinagre o la sal ⁷¹ para purificar aún más los metales, eliminando impurezas que puedan estar aún en el metal.	Aislar los metales impuros de los metales puros como el oro o la plata ⁷² .	Procesos de disolución y precipitación metálica para la separación de aleaciones.

Nota: Creación original del autor, aunque con información tomada del texto *De Re Metallica* de Agrícola

En la tabla anterior se presentan las etapas que tenía en cuenta Agrícola a la hora de desarrollar la extracción y purificación de los metales. Además, se presenta una interpretación actual de lo que se estaba realizando en términos instrumentales modernos.

9.2. El fuego como agente de separación y purificación

En el texto de Agrícola (1556), el fuego cumple una doble función, al destruir y purificar el mineral. En primer lugar, al calentar el mineral se rompe la unión entre las sustancias impuras y el metal, y en segundo lugar con la aplicación de más fuego se refina el metal hasta hacerlo brillar. Este proceso anterior, no solo es un procedimiento físico sobre el cambio en los metales, sino a manera de simbología, tiene una particular relación con la revivificación de Lavoisier, en donde se traía de vuelta a la vida al metal tras pasar por un proceso de calcinación.

En ambos casos el fuego actúa como el agente transformador de las sustancias y es capaz de hacer que se genere un cambio en la materia. Agrícola menciona que, en los metales preciosos

⁷¹ Cabe resaltar que los nombres del mercurio, el vinagre o la sal, o cualquiera de los reactivos mencionados fueron adaptados bajo la nomenclatura actual, ya que en este momento histórico tenían otras formas de nombrarlos.

⁷² Se debe tener en cuenta que en la época los metales como el oro y la plata eran codiciados por su gran valor tanto económico como místico gracias a los alquímicos.

como el oro y la plata, ellos estando muertos (en forma de mineral) recuperan su aspecto vivo (haciendo referencia a su brillo metálico) tras pasar por el calentamiento en el horno. Lavoisier dos siglos más adelante repetirá esta escena, pero en sus laboratorios, al calentar los óxidos metálicos para que los metales vuelvan a surgir brillantes y puros, pero en esta ocasión cerciorándose de un nuevo protagonista, el oxígeno.

Si se pretende hacer una comparación entre Agrícola, Lavoisier y Boyle cuando se habla sobre el volver al metal en su estado original, se debe tener en cuenta que Boyle también tenía un término para este proceso llamado “redificación”, refiriéndose al revertir el proceso por el que el metal ha reaccionado con azufre o se ha calcinado. A continuación, en la siguiente tabla, se intentará relacionar las tres definiciones del proceso descrito al inicio de este párrafo.

Tabla 16. Comparación conceptual entre Agrícola, Lavoisier y Boyle.

AUTOR	SIGLO	CONCEPTO USADO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	FINALIDAD	INTERPRETACIÓN MODERNA
Agrícola	XVI	Purificación	Separación del metal de las impurezas provenientes de los minerales mediante fuego, lavado y amalgamación.	Obtener el metal puro y brillante.	Reducción metalúrgica y refinación de metales.
Boyle	XVII	Redificación	Reversión del cambio sufrido por un metal después de su calcinación o reacción con azufre.	Devolver al metal a su forma metálica.	Reducción química (pérdida de oxígeno o ganancia de electrones)
Lavoisier	XVII	Revivificación	Separación del oxígeno del óxido metálico mediante el calor o el carbono.	Devolver la vida al metal o volver a su estado original.	Reducción de óxidos metálicos o liberación de oxígeno.

Nota: Creación original del autor, basado en *De Re Metallica* de Agrícola, Tratado elemental de la química de Lavoisier y *The Experimental History of Colours* de Boyle.

Como se menciona en la tabla, un proceso que genera un producto de reacción parecido en todos los casos (el metal puro), fue denominado de diferentes formas durante la historia. Aunque se debe tener en cuenta que el cómo llegaron al producto final fue cambiando también, por lo que

los reactivos usados como punto de partida tienen un origen distinto, por lo que formalmente se tendrá que usar la definición formal que se le dio en cada una de las épocas.

9.3. Una continuidad experimental, del fuego a la luz

En De Re Metallica (1556) el fuego es el agente que se usa para revivir o liberar el metal del mineral, en las reacciones fotoquímicas modernas el agente encargado de esta función será la luz. En el revelado fotográfico, la luz incide sobre los haluros de plata (en este caso, esta sería la forma impura del metal o como en la metalurgia sería el mineral extraído del suelo) y provoca la reducción de los iones plata a plata metálica (esta sería la forma del metal revivificado, purificado o redificado o simplemente en su estado puro) generando el oscurecimiento de la imagen en el papel.

El anterior proceso se podría considerar como una purificación luminosa en donde la luz actúa como el fuego de Agrícola y que funciona como una sustancia invisible que revive la plata contenida en el papel fotográfico, devolviéndola a su estado elemental.

De este modo, la revivificación de Lavoisier, la purificación de Agrícola y la redificación de Boyle convergen simbólicamente en el fenómeno fotoquímico y en los tres casos se utilizan formas de energía (calor o luz) que son capaces de liberar el metal, ya sea del óxido, del mineral o de los haluros, mostrando su esencia en cada uno de los casos.

10. DEL FUEGO, EL CALOR, LA LUZ Y LOS RAYOS QUÍMICOS A LA FOTOGRAFÍA: UNA RUTA METODOLÓGICA CON PAPEL SENSIBLE A LA LUZ.

Como se pudo ver en los apartados anteriores, Bunsen y Roscoe en el siglo XIX establecieron rutas experimentales con la idea de comprender cómo la luz hacía parte de las transformaciones químicas que se pudieran medir. Para poder comprender este fenómeno utilizaron como base la reacción entre el gas hidrógeno y el gas cloro para la formación de ácido clorhídrico y de esta manera cuantificar los “rayos químicos” responsables de esta transformación. Estos rayos químicos, además fueron desarrollados como agentes responsables de las transformaciones químicas a lo largo de los textos de Lavoisier, Boyle y Agrícola, en donde se mencionaron observaciones que tuvieron estos autores a la hora de categorizar la transformación de las sustancias; para este caso el color es fundamental y será usado como principio químico que asegura la generación de una reacción química.

Hoy en día se puede entender que estos rayos químicos mencionados por Bunsen y Roscoe como una parte del espectro lumínico. Se mencionan en primer lugar, a Bunsen y Roscoe, ya que ellos insinuaron que la luz tenía diferentes partes, ya que los otros autores consultados, usaban el concepto de luz como algo sin partes, como un todo. Esta parte del espectro lumínico entonces se relaciona con la transformación de las sustancias, específicamente va a ser el responsable de que los haluros de plata presentes en el papel fotográfico se alteren bajo su presencia.

Con la inspiración generada por los montajes experimentales de los autores del siglo XIX, del siglo XVII y del siglo XVI la idea es reflexionar sobre estas experiencias, pero reemplazando las reacciones desarrolladas por los experimentadores (formación de ácido clorhídrico, obtención de óxidos, cambios de color por diferentes agentes, purificación de metales, entre otras) por la reacción de óxido - reducción de los haluros de plata en el papel fotográfico.

A continuación, se podrá encontrar la tabla 17 en donde se pueden ver algunos experimentos propuestos con el objetivo de llegar a comprender las dinámicas de la luz en el papel fotográfico.

Tabla 17. Experimentos propuestos para la comprensión de la dinámica de la luz en el papel fotográfico.

FASE	ACTIVIDADES	INTENCIONALIDADES
Efectos	1. Determinación de la luz como factor único en la reacción de reducción de los haluros de plata, mediante experimentos en donde se permita observar si hay cambios en las características del papel fotográfico solo cuando la luz entra en contacto con el. Se proponen 4 montajes experimentales: en el primero el papel fotográfico no entra en contacto con la luz, en el segundo el papel fotográfico sí entra en contacto con la luz, en el tercero parte del papel fotográfico es cubierto para que no entre en contacto con la luz y parte del papel sí entra en contacto con la luz y por último, el papel fotográfico sin contacto con la luz, pero con una	a. Como lo hicieron Bunsen y Roscoe con la reacción de los gases cloro e hidrógeno cuando querían probar si realmente era la luz la que llegaba a afectar la reacción de combinación de los gases, la idea en este punto es observar si la reacción de los haluros de plata se genera específicamente a causa de la luz y no de otro factor como la temperatura o la humedad o cualquier otra sustancia que se encuentre en contacto con el papel fotográfico. b. Se pretende conectar la idea de Boyle en la que menciona que los cambios cromáticos en las sustancias son evidencia de una transformación química. c. El objetivo es determinar los tiempos de reacción adecuados, en donde por medio de

	fuelle de calor para verificar si la temperatura genera la reacci3n.	las tonalidades del papel fotogr3fico se muestre cu3l es el segundo en donde la luz genera un efecto visible pero no completo en los haluros de plata.
	2. Reacci3n del papel fotogr3fico utilizando una misma fuente de luz con una misma intensidad lumínica (se medirá con un lux3metro) pero alterando los tiempos de exposici3n, desde 1 segundo hasta los 10 segundos, comparando las imágenes que se forman en cada uno de los casos.	
Discriminaci3n de los efectos	3. Reacci3n de una fuente de luz con la misma intensidad lumínica (se medirá con un lux3metro) a diferentes distancias del papel fotogr3fico. (50cm, 100cm, 150cm y 200cm).	d. De la misma manera como lo hicieron Bunsen y Roscoe, la intencionalidad de esta actividad es verificar si las distancias a las que se encuentra el foco de luz afectan la reacci3n de los haluros de plata del papel fotogr3fico. Para este caso se intentará comprobar si hay una distancia media que permita una reacci3n más efectiva⁷³. e. Realizar mediciones cuantitativas de la intensidad lumínica para relacionarlas con la cantidad de plata que se reduce, de la misma manera que realizó Lavoisier en términos de las mediciones iniciales de reactivo utilizado, en este caso se mide la cantidad inicial de luz usada. f. Con una intenci3n similar a la de Bunsen y Roscoe, la idea de probar diferentes fuentes de luz con longitudes de onda distintas es mirar las característic3s de estas

⁷³ Las mediciones en el papel fotogr3fico se har3n con un fot3metro digital con el que se tenga la posibilidad de diferenciar los tonos de la “fotografía” despu3s de la interacci3n con la luz.

	4. Montaje de la reacción química entre la luz y el papel fotográfico utilizando diferentes fuentes de luz con distintas longitudes de onda (Roja, Verde, Azul y Blanca).	fuentes de luz a la hora de reaccionar con el papel fotográfico e identificar si al cambiar la fuente, la reacción ocurre de la misma manera o existe una afinidad de los haluros de plata por algún tipo de longitud de onda específica. Además de determinar la longitud de onda más apropiada para los haluros de plata, también se podría identificar la que menos reacciona o no reacciona, con el objetivo de tener ambientes de revelado apropiados para los experimentadores. g. Usando como referencia a Bunsen y Roscoe, cuando utilizan la luz del día despejado y la luz del día soleado para comparar los efectos se propone la actividad de la observación de la reacción con diferentes intensidades de luz. De la misma manera Boyle propone filtros que en el caso de nosotros será el cambio de intensidad para la reacción y Agrícola vincula los fundentes para aumentar la temperatura en la reacción de purificación, en este caso el instrumento nos permite aumentar o disminuir la experiencia.
	5. Montaje utilizando las mismas fuentes de luz que se usaron en la actividad 4 pero con intensidades diferentes. El instrumento que se va a utilizar (fuente de luz) permite 5 intensidad de luz diferentes, desde intensidades altas, hasta intensidades bajas (serán medidas con el luxómetro) en cada una de las longitudes de onda (Rojas, Verdes, Azules y Blancas).	
Relación con los cambios químicos	6. Una vez determinada la distancia a la que se debe proponer la fuente de luz, el tipo de luz óptima para la reacción de los haluros de plata en el papel fotográfico, los tiempos de exposición adecuados del papel fotográfico y la intensidad requerida para la formación de una imagen latente lo más nítida posible; se propone la construcción de la cámara fotográfica para la	h. Relacionar la evidencia observable (color en el papel fotográfico) en procesos químicos: Reducción fotoquímica (Paso de los iones plata a plata metálica) bajo la influencia de un agente químico, para nuestro caso la luz.

toma de fotografías y posterior revelado ya de una imagen latente.
--

Nota: Creación original del autor, basado en *De Re Metallica* de Agrícola, Tratado elemental de la química de Lavoisier y The Experimental History of Colours de Boyle.

Teniendo como referencia las actividades e intencionalidades descritas en la tabla anterior, a continuación, se desarrollarán los procedimientos, características, instrumentos y demás asuntos que serán relevantes a la hora de aplicar cada una de las actividades con los estudiantes.

Es importante tener en cuenta que esta ruta metodológica en un primer instante se desarrolló por parte de investigador y en una segunda instancia se llevó al aula de clase. Los resultados que se obtuvieron y que se muestran a continuación en la investigación corresponden a las actividades resultantes en el aula de clase. También es importante resaltar que esta actividad fue desarrollada con 12 estudiantes de grado octavo y noveno pertenecientes a un proyecto de investigación escolar que se enfoca en el estudio de las reacciones químicas, en este punto estudiando las reacciones de óxido – reducción que hacen parte de la malla curricular para esta población.

La narrativa que vamos a presentar muestra el énfasis en el cómo se desarrollaron las actividades y cómo esas actividades son un espacio propicio para abordar los problemas de la óxido - reducción en la clase de ciencias naturales.

10.1 Actividad preliminar

Aunque dentro de la ruta metodológica no se menciona una actividad preliminar, esto porque no tiene una intencionalidad conceptual, ni instrumental, sino más bien es una preparación que se debe hacer del espacio en donde se va a desarrollar la mayor parte de los experimentos. Esta preparación previa es fundamental para el desarrollo de las actividades posteriores, ya que se trata de adecuar el cuarto en donde se van a hacer los experimentos. Este cuarto debe tener la particularidad de impedir el ingreso de cualquier rayo de luz. En otras palabras, se debe adecuar un cuarto oscuro para el revelado fotográfico final y para las pruebas que se van a realizar inicialmente.

Para el caso de esta investigación se usó en nuestra institución⁷⁴ un cuarto pequeño destinado para el almacenamiento de elementos de aseo. Este cuarto fue ideal, ya que al no tener ventanas y tener una puerta completa sin ningún tipo de cristal, la adecuación fue un poco más sencilla, ya que consistió en sellar las ranuras⁷⁵ por donde ingresaban todavía algunos rayos de luz. Este sellado se realizó con cartón pintado de color negro y con bolsas negras. La forma de probar si no ingresaba rayos de luz fue por medio del luxómetro (que se describe en una imagen a continuación) cuando indicará que la cantidad de rayos de luz era de 0.

Imagen 6. Luxómetro usado como instrumento de medición de la cantidad de luz en los experimentos.



Nota: Fotografía tomada por el autor de esta investigación.

El instrumento que se encuentra en la imagen anterior se trata de un luxómetro digital portátil fabricado por la empresa UNI-T, diseñado para medir intensidades de luz de diferentes entornos. Este luxómetro tiene un sensor fotoeléctrico que capta la luz incidente de la fuente de luz y lo traduce en un valor numérico, mostrándolo en la pantalla del dispositivo. El rango de medición va desde los 0 lux hasta los 199990 lux, con la posibilidad de graduar mínimos y máximos y una alta precisión en sus medidas.

Para su uso se debe encender el dispositivo y apuntar el sensor que tiene en la parte superior hacia la fuente de luz que se quiere medir y luego esperar algunos segundos hasta que el valor se estabilice para determinar la cantidad de luz. El valor que arroja después de la medición no solo depende de la fuente de luz, sino también de la distancia a la que se encuentre de la fuente y en

⁷⁴ La institución en la que se realizaron las pruebas y el desarrollo de la ruta metodológica fue un colegio en la sabana de Cundinamarca.

⁷⁵ Estas ranuras por las que ingresaba la luz eran por debajo y por los lados y la parte superior, ya que no se ajustaba herméticamente la puerta al cuarto.

ángulo de incidencia de los rayos de luz. La unidad de lux que se tuvo en cuenta para las mediciones representa la cantidad de luz que incide sobre una superficie específica, es decir, mide la cantidad de iluminación que llega a un área determinada UNI-T (s.f).

Una vez que se midió que la cantidad de luz que ingresaba en el cuarto oscuro era de 0 lux, se inició con el desarrollo de la actividad 1.

10.2 Actividad 1 (Efectos) Efectos de la luz sobre el papel fotográfico

Para esta primera actividad, que tenía como objetivo determinar si la única causa de la transformación de los haluros de plata en el papel fotográfico era la luz; se realizaron 4 montajes experimentales⁷⁶:

- a. Se toman trozos de papel fotográfico y sin que se expongan a la luz se llevan al proceso de revelado⁷⁷. Una vez revelado el papel fotográfico que no tuvo interacción con la luz, se pudo ver que la imagen que mostró fue la siguiente:

⁷⁶ Cabe resaltar que para realizar las pruebas con el papel fotográfico se cortaron previamente pequeños trozos de papel para realizar cada una de las pruebas. Estos trozos de papel se recortaron dentro del cuarto oscuro en completa oscuridad ayudándose de un molde con la medida aproximada en cada uno de los casos. Por lo anterior, cuando se mencionan las pruebas hechas con el papel fotográfico, se refiere a los trozos cortados y preparados con anterioridad

⁷⁷ Para el revelado fotográfico se utilizan tres reactivos diferentes. En primer lugar, el papel fotográfico se pasa por un reactivo revelador (aunque en la etiqueta del frasco no se menciona el reactivo, se trata de una solución alcalina que tiene algún tipo de reductor como el mentol) que es el encargado de reducir los haluros de plata a plata metálica, es decir, el encargado de que se pueda ver el color negro; el papel se pasa por este reactivo durante aproximadamente 1 minuto. En segundo lugar, el papel fotográfico se enjuaga con agua, en donde el objetivo será que haga que se detenga la acción del revelador, es decir, que se dejen de reducir los haluros de plata evitando que se siga oscureciendo el papel fotográfico; el enjuague se realiza por aproximadamente 30 segundos. Por último, el papel fotográfico se pasa por un reactivo fijador (de la misma manera que con el reactivo revelador, el frasco de esta sustancia no especificaba el compuesto, pero se asume que debe ser tiosulfato de sodio o tiosulfato de amonio) que se encarga de disolver los haluros de plata que no reaccionaron por causa de la luz, permitiendo que la imagen formada en el papel permanezca en el tiempo y no reaccione con la luz cuando se exponga a la misma; en el revelador se debe mantener durante 2 minutos aproximadamente (Ilford Photo, 2003). También se debe tener en cuenta que este proceso de revelado se debe realizar dentro del cuarto oscuro.

Imagen 7. Papel fotográfico revelado sin contacto con la luz y valor de intensidad de luz detectado por el luxómetro en este experimento.



Nota: Fotografías tomadas por el autor de la investigación.

También cabe resaltar que, en todas las medidas realizadas de la intensidad de la luz, el luxómetro arrojó un valor de 0 lux, como se evidencia en la imagen 7.

- b. Se toman trozos de papel fotográfico y se ponen en contacto con la luz blanca, por un periodo aproximado de 10 segundos, en cada uno de los casos, y se llevan al proceso de revelado. Una vez revelado el papel fotográfico que tuvo interacción con la luz, se pudo ver que la imagen que mostró fue la siguiente:

Imagen 8. Papel fotográfico revelado que si tuvo contacto con la luz y valor de intensidad de luz detectado por el luxómetro en este experimento.



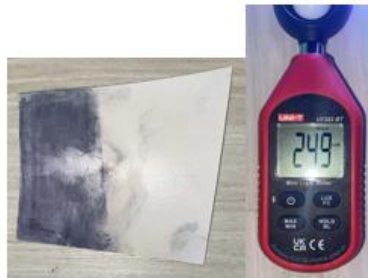
Nota: Fotografías tomadas por el autor de la investigación.

En todas las medidas realizadas de la intensidad de la luz⁷⁸ del luxómetro arrojó un valor aproximado de 249 lux, como se evidencia en la imagen 8.

⁷⁸ Para este caso se usó luz blanca como fuente de luz.

- c. Para el tercer procedimiento se cubre con cinta de enmascarar la mitad del papel fotográfico y se deja descubierta la otra mitad del papel. Luego, se expone a la luz el trozo de papel fotográfico y se pasa al proceso de revelado. Una vez revelado el trozo de papel que tiene una parte cubierta por la cinta, se genera el resultado que se puede ver a continuación en la imagen 9.

Imagen 9. Papel fotográfico revelado que tiene una parte cubierta con cinta y otra parte expuesta a la luz y valor de intensidad de la luz detectado por el luxómetro.



Nota: Fotografías tomadas por el autor de la investigación.

En todas las medidas realizadas de la intensidad de la luz, el luxómetro arrojó un valor promedio de 249 lux, como se puede apreciar en la imagen 9.

- d. Para el último montaje, se van a dejar los trozos de papel encima de una fuente de calor⁷⁹ y sin exponerlos a la luz se llevan al proceso de revelado. Una vez revelados los trozos de papel fotográfico, la imagen del resultado de este montaje, en que se usó calor y no luz, se puede apreciar a continuación:

⁷⁹ Para el caso de esta investigación, se utilizó una plancha para quitarle las arrugas a las prendas de vestir para calentar los trozos de papel fotográfico.

Imagen 10. Papel fotográfico revelado cuando la fuente de energía era el calor y no la luz, y valor de la intensidad de luz usada durante el procedimiento.



Nota: Fotografías tomadas por el autor de la investigación.

En todas las medidas realizadas el valor de la intensidad de luz fue de 0 lux.

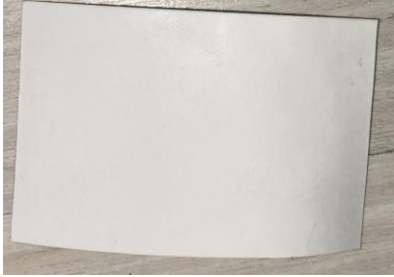
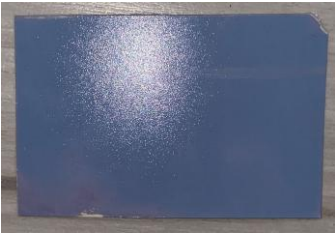
10.3 Actividad 2 (Efectos) Efecto de los tiempos de exposición del papel fotográfico a la fuente de luz

Para la segunda actividad sobre los efectos de la luz en el papel fotográfico, se debe considerar que gracias a la actividad 2 se puede asegurar que la luz sí genera un cambio visible en el papel fotográfico. Ahora, con la segunda actividad se pretende determinar si los tiempos de exposición producen un cambio visible dentro de los tonos que toma el papel fotográfico⁸⁰. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de los trozos de papel fotográficos expuestos a la luz blanca, pero variando los tiempos de exposición, luego del proceso de revelado:

Tabla 18. Resultados de la imagen revelada del papel fotográfico cuando se expuso a luz blanca, pero se variaron los tiempos de exposición.

TIEMPOS DE EXPOSICIÓN	IMAGEN QUE SE GENERÓ
------------------------------	-----------------------------

⁸⁰ Se debe tener en cuenta que la variable en este caso será el tiempo de exposición, pero la distancia a la que se encuentra el papel fotográfico de la fuente de luz es la misma, en este sentido, se debe mencionar que la distancia total fue de 200 centímetros o 2 metros aproximadamente.

1 SEGUNDO	
2 SEGUNDOS	
4 SEGUNDOS	
6 SEGUNDOS	
8 SEGUNDOS	

10 SEGUNDOS	
-------------	--

Nota: Tabla elaborada por el autor de la presente investigación.

Como se pudo ver en la tabla, aparecen los segundos a los que se expuso cada uno de los trozos de papel fotográfico y la imagen arrojada después del proceso de revelado fotográfico. El valor de la intensidad de luz arrojado por el luxómetro fue de 239 lux en promedio para cada una de las mediciones.

10.4 Actividad 3 (Discriminación de los efectos) Cambios en las distancias del papel fotográfico a la fuente de luz

Con respecto a los resultados arrojados en la actividad 2 sobre la intensidad de la luz, se pudo ver que el tiempo ideal fue de 6 a 8 segundos de exposición, ya que con tiempos inferiores no se percibía una coloración en el papel, mientras que con tiempos superiores el papel se veía completamente negro. Teniendo en cuenta estos resultados obtenidos y confirmando que el tiempo apropiado para que se capten las imágenes de manera que se distingan mejor fue de 6 a 8 segundos ahora lo que se quiere determinar es si la distancia logra afectar el color que toma el papel fotográfico. Por esta razón, se proponen las distancias que se mencionan en la siguiente tabla, y de la misma manera, los resultados obtenidos se encuentran consignados en la tabla:

Tabla 19. Resultados de los trozos de papel fotográfico afectados por la luz a diferentes distancias.

DISTANCIAS	PAPEL FOTOGRÁFICO REVELADO	INTENSIDAD DE LUZ
------------	----------------------------	-------------------

200 CM		93 lux
150CM		163 lux
100CM		419 lux
50CM		1305 lux

Nota: Tabla elaborada por el autor de esta investigación.

Cabe recalcar que la intensidad de la luz detectada por el luxómetro fue disminuyendo aun cuando se tenía la misma fuente de luz graduada para que no cambiará la intensidad inicial, pero al alejarse de la misma, la intensidad que llegaba al papel fotográfico fue menor. Esta intensidad se midió para todos los experimentos por medio del luxómetro.

10.5 Actividad 4 (Discriminación de los efectos) Experimentación con luces de diferentes colores

Para esta actividad se pretende evaluar si las diferentes longitudes de onda logran transformar los haluros de plata del papel fotográfico de la misma manera como lo hace la luz blanca. Esta actividad ayudará a determinar con qué longitud de onda (color de luz) no se afecta el papel fotográfico y poder realizar procesos como el montaje del papel fotográfico y el posterior

revelado del mismo con una fuente de luz que nos permita ver lo que se hace, ya que hasta este punto, dentro del cuarto oscuro todos los procesos se hacen en completa oscuridad.

Las luces que se van a evaluar son la blanca⁸¹, verde, roja y azul. Es importante mencionar que la fuente de luz que se ha estado utilizando durante todos los experimentos anteriores es un reflector led tableta de 200W. A continuación, se muestra la fuente de luz y se da una pequeña descripción de la misma, antes de continuar con el desarrollo de la actividad 4:

Imagen 11. Fuente de luz utilizada durante los experimentos.



Nota: Fotografía tomada por el autor de esta investigación.

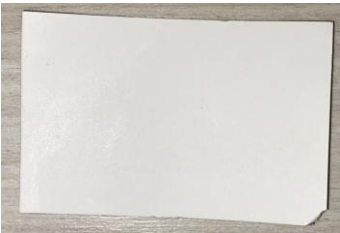
Este reflector usado como fuente de luz está diseñado para generar una iluminación uniforme, estable y de alta potencia. Este reflector cuenta con la posibilidad de graduar la intensidad de la luz en 5 niveles, desde niveles altos hasta niveles bajos; además cuenta con una estructura de aluminio que disipa la temperatura, por lo que no se sobre calienta ni tampoco genera calor que pueda afectar los experimentos. Por otro lado, tiene la posibilidad de emitir luz de diferentes colores, como blanco, rojo, azul, y verde, así como los matices derivados de estos colores, lo que permite transitar por diferentes longitudes de onda Titanium (2024)⁸². Todo lo anterior (intensidades de luz y color que emite la fuente de luz) se puede controlar mediante un control remoto, que permite la graduación de las variables y además autonomía de los estudiantes para encender y apagar la fuente de luz desde las distancias en donde tienen el papel fotográfico.

⁸¹ Esta será utilizada como punto de referencia para las otras pruebas.

⁸² Los colores que permite el reflector se encuentran dentro de la imagen en el control de la fuente de luz.

A continuación, se puede ver la tabla con los resultados de las mediciones realizadas. Se debe saber que solamente se usaron las luces de las longitudes de onda que se mencionan en la tabla y no los colores derivados que aparecen en el control de la fuente de luz.

Tabla 20. Resultados del revelado de los trozos de papel cuando se hicieron interactuar con diferentes colores de luz.

COLOR DE LA LUZ	FOTOGRAFÍA REVELADA	INTENSIDAD DE LUZ
BLANCO		503 lux
VERDE		372 lux
ROJO		168 lux
AZUL		428 lux

Nota: Tabla elaborada por el autor de esta investigación.

Como se pudo ver en la tabla, el papel fotográfico se transformó gracias a las luces blancas, azules y verdes se transforman los haluros de plata presentes en el papel fotográfico, mientras que cuando se puso como fuente de luz la luz roja, el papel fotográfico quedó blanco después del

revelado y no se percibió un cambio en los colores del papel fotográfico. Además, también se puede ver el valor de lux que arrojó el luxómetro, en donde se evidencian cambios bastante fuertes con respecto a la luz blanca que es con la que se centra esta investigación. Lo valioso de esta actividad fue que se pudo identificar que la fuente de luz roja no afecta al papel fotográfico, por lo que el proceso de revelado y montaje en la cámara fotográfica más adelante, se puede hacer bajo este tipo de luz y no afectará el proceso de transformación.

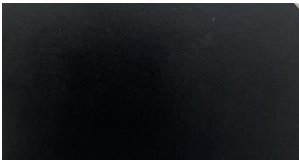
10.6 Actividad 5 (Discriminación de los efectos) Experimentación con diferentes colores de luz y sus diferentes intensidades

En esta actividad se pretendió observar lo que le ocurre al papel fotográfico cuando se hace interactuar con diferentes colores de luz, pero esta vez, y ya que la fuente de luz lo permite, variar también la intensidad de cada uno de estos colores de luz.

Para observar los resultados obtenidos, se utilizarán diferentes tablas de resultados (cada una pertenece a un color de luz diferente), en donde se puede encontrar 5 intensidades de luz, en donde la intensidad 1 va a ser la intensidad más baja y la intensidad 5 va a ser la intensidad más alta. Las intensidades 2, 3 y 4 son las intermedias. También se tendrán los valores de la intensidad en unidades de lux arrojadas por el luxómetro en cada uno de los casos.

Tabla 21. Resultados del revelado fotográfico evaluando diferentes intensidades de luz blanca.

INTENSIDADES DE LA LUZ BLANCA	FOTOGRAFÍA DEL PAPEL FOTOGRÁFICO REVELADO	MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE LUZ
1		95 lux
2		197 lux

3		532 lux
4		1103 lux
5		1387 lux

Nota: Tabla elaborada por el autor de esta investigación.

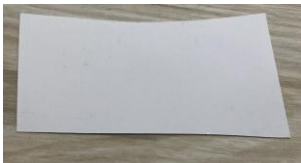
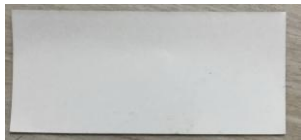
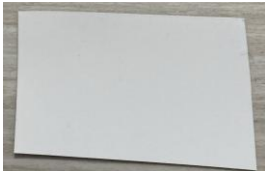
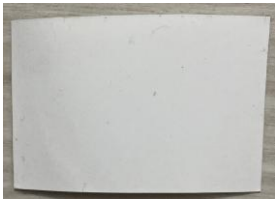
Tabla 22. Resultados del revelado fotográfico evaluando diferentes intensidades de luz verde.

INTENSIDADES DE LA LUZ VERDE	FOTOGRAFÍA DEL PAPEL FOTOGRÁFICO REVELADO	MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE LUZ
1		57 lux
2		175 lux
3		280 lux

4		346 lux
5		428 lux

Nota: Tabla elaborada por el autor de esta investigación.

Tabla 23. Resultados del revelado fotográfico evaluando diferentes intensidades de luz roja.

INTENSIDADES DE LA LUZ ROJA	FOTOGRAFÍA DEL PAPEL FOTOGRÁFICO REVELADO	MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE LUZ
1		21 lux
2		72 lux
3		105 lux
4		148 lux
5		168 lux

Nota: Tabla elaborada por el autor de esta investigación.

Tabla 24. Resultados del revelado fotográfico evaluando diferentes intensidades de luz azul.

INTENSIDADES DE LA LUZ AZUL	FOTOGRAFÍA DEL PAPEL FOTOGRÁFICO REVELADO	MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE LUZ
1		47
2		115
3		258
4		330
5		372

Nota: Tabla elaborada por el autor de esta investigación.

Las anteriores actividades realizadas son el punto de partida para comprender los cambios que están teniendo los haluros de plata en el papel fotográfico cuando interactúa con la luz.

VARIABLES COMO LA DISTANCIA DESDE LA FUENTE DE LUZ, LOS TIEMPOS DE EXPOSICIÓN DEL PAPEL FOTOGRÁFICO A LA FUENTE DE LUZ O EL COLOR DE LUZ QUE BENEFICIA Y QUE NO BENEFICIA LA REACCIÓN, FUERON LOS QUE SE TUVIERON EN CUENTA PARA PODER HACER YA EL MONTAJE EXPERIMENTAL FINAL, EN EL QUE SE TOMARON FOTOGRAFÍAS USANDO LA CÁMARA ESTENOPEICA.

10.7 Actividad 6 (Relación con los cambios químicos) La fotografía con la cámara estenopeica

Teniendo en cuenta lo que mencionaba Boyle en sus escritos y los autores que se relacionaron en apartados anteriores, una de las pruebas observables de una reacción química es el cambio de color. Relacionando las actividades anteriores con la toma final de la fotografía, se tiene como actividad final tomar fotografías con la cámara estenopeica.

En primer lugar, se realizó la construcción de las cámaras fotográficas mediante cajas de zapatos que fueron adecuadas para el procedimiento que se iba a realizar. Para la adecuación de las cajas, se pintaron por dentro y por fuera con pintura de color negro. Una vez pintadas las cajas de zapato, se procedió a verificar que no tuvieran ningún tipo de agujero por el que pudiera ingresar la luz y se cubrió con cinta aislante o cinta negra, agregando una capa de pintura adicional sobre la cinta. Por último, se verificó de nuevo la cámara y se le realizó un arriado ayudado con una aguja en uno de los lados de la caja⁸³ y se guardó para hacer el montaje del papel fotográfico.

Para el montaje del papel fotográfico, se ingresaba al cuarto oscuro en donde se habían desarrollado las actividades anteriores y usando la fuente de luz con color rojo (para poder observar de mejor manera lo que se hacía) se recortaron trozos de papel fotográfico y se pegaron en el extremo contrario del que se realizó el agujero con la aguja en el interior de la caja. Por último, se cerró la caja y salieron a tomar las fotografías.

Para la toma de fotografías se tuvieron en cuenta distancias de 100 a 150 centímetros del objeto que iban a fotografiar, que fueron las que mejores resultados, en términos de nitidez⁸⁴, que se detectaron en las actividades iniciales. Además, los tiempos de exposición del papel

⁸³ Este agujero se realizó con el objetivo de dejar ingresar los rayos de luz que iba a afectar el papel fotográfico en el interior de la cámara

⁸⁴ Cuando se menciona la nitidez, se refiere a que no quedara el papel ni blanco ni negro, sino en un tono intermedio. Lo anterior, para lograr distinguir los objetos que se iban a fotografiar.

fotográfico⁸⁵ al objeto que se quería fotografías fue en promedio de 6 a 8 segundos que fueron los que mejores resultados generaron en las actividades anteriores.

Por último, para el proceso de revelado fotográfico, volvíamos al cuarto oscuro (ya con el papel expuesto dentro de la cámara) y se realizaba el proceso de revelado fotográfico siguiendo los procedimientos ya descritos en las partes anteriores de la investigación.

Se pudo ver que, las imágenes en la mayoría de los casos presentaban nitidez y características visibles aceptables, pero de la misma manera como les ocurrió a Bunsen y Roscoe, en los días soleados la intensidad de luz era muy alta, por lo que las fotografías no salían y de la misma manera en los días nublados, tampoco se tenían resultados adecuados, pero esta vez por falta de intensidad en los rayos.

Como una manera de vincular las actividades realizadas, el papel del experimento en el aula de clase y las experiencias que pude vivir con la aplicación de la ruta metodológica, se propone a continuación un último apartado en el que se relacionan algunas de las reflexiones sobre mi papel docente en el aula de clase.

11. LA LUZ COMO CAMINO DE LA ENSEÑANZA Y LA COMPRENSIÓN.

El proceso que se desarrolló durante las sesiones de clase me permitió entender más allá de las reacciones químicas, los procesos de experimentación y observación. Estos procesos de experimentación y observación pueden convertirse en caminos para la construcción de conocimiento en el aula de clase. Las intenciones planteadas en un principio en esta investigación encontraron un sentido a medida que las actividades de experimentación con el papel fotográfico avanzaban. Estas actividades planteadas en la ruta metodológica, permitieron experimentar junto con mis estudiantes la transformación de la materia como un fenómeno medible, visible, y los más importante, formativo.

En las primeras actividades cuando se proponía ver si realmente era la luz la que provocaba un cambio en el papel fotográfico y no otros factores como el calor, comprendí que gracias a las observaciones de los estudiantes, la enseñanza de la química debe partir del asombro y de la

⁸⁵ Se debe tener en cuenta que la exposición del papel fotográfico al objeto se realizaba destapando el agujero hecho con la aguja. Cuando se hacía el montaje del papel fotográfico en el interior de la caja y se cerraba la caja, se ponía un trozo de cinta aislante o cinta negra por fuera de la caja sobre el agujero hecho con la aguja, lo anterior, para evitar el ingreso de rayos de luz. Cuando se quería tomar la fotografía se despegaba la cinta el tiempo que se menciona en el texto y se volvía a cerrar.

pregunta, más no de la explicación. Cada actividad formulada (variar tiempos, variar distancias, cambiar intensidades, etc) se convertía en actividades que les daban la oportunidad a los estudiantes para plantear hipótesis y construir relaciones, que al final y en el progreso de la actividad se validaban o no a través de la experiencia. El estar probando, cambiando y reformulando me llevó a valorar la importancia del error y la observación sensible como parte del proceso de aprender en ciencias naturales, reconociendo las relaciones que surgen desde lo que se ve y lo que se interpreta del fenómeno.

A través de los diferentes montajes experimentales, pude reconocer que en ciencias naturales no se debe enseñar conceptos, sino más bien, crear condiciones para que el mismo fenómeno pueda hablar. Al ver los cambios de color en el papel fotográfico, los estudiantes no solo estaban aprendiendo sobre reacciones de óxido - reducción, sino que también estaban reconstruyendo la historia de las ciencias, desde las observaciones de Boyle, las revivificaciones de Lavoisier, la acción química de la luz de Bunsen y Roscoe y la purificación del metal de Agrícola. De esta manera, la ruta metodológica que se planteó permitió ver que el aula de clase se puede convertir en un laboratorio de historia y de pensamiento, en donde las ciencias naturales se aprenden haciendo y comprendiendo su propia evolución.

Más allá de la experiencia vivida en el aula de clase, el desarrollo de esta investigación permitió la construcción de una ruta metodológica que no tuvo como propósito ni evaluar ni sistematizar los resultados, sino proponer los primeros frutos recogidos con las actividades experimentales propuestas y los procesos pedagógicos implementados. La ruta metodológica se convirtió en un punto de partida que logra abrir varias posibilidades y no solo es un instrumento de cierre. El valor de la implementación de esta ruta de trabajo está en el planteamiento de preguntas sobre la enseñanza de la química y sobre la manera en la que un fenómeno puede hacerse comprensible gracias a las observaciones, a la sensibilidad y a la historia. Esta ruta metodológica no fue diseñada para medir logros, sino para reconocer efectos formativos en el encuentro del estudiante, la luz y la materia. La construcción de la ruta metodológica se realizó precisamente a partir de la reconstrucción histórica de los procesos de descubrimiento científico, en donde cada uno de los autores revisados aportó una manera diferente de mirar el fenómeno de la óxido - reducción. En este sentido, la ruta metodológica no surge como un diseño impuesto desde la pedagogía contemporánea sino que surge como el resultado de volver a los orígenes experimentales de la ciencia y hacer traducciones para diseñar propuestas pedagógicas actuales, en donde la

historia se convierte en el camino que guía la generación de experiencias significativas en el aula de clase.

Desde esta perspectiva, el análisis histórico tiene una importancia central en esta investigación. Los textos que se recogieron en el transcurso del trabajo, desde Agrícola, pasando por Boyle, llegando a Lavoisier y finalizando con Bunsen y Roscoe, no sirvieron como una simple recolección histórica de hechos, sino que permitió pensar a la historia como una herramienta pedagógica que permitió proponer una ruta creativa para el trabajo experimental desarrollado. El diálogo que se llevó a cabo con estos autores hizo posible entender que las explicaciones científicas nacen desde la experiencia y que al traer estas experiencias al aula de clase, este espacio se logra convertir de nuevo en un laboratorio en el que se puede lograr originar nuevamente el conocimiento. Volver a las observaciones de Boyle sobre los cambios de color, retomar las ideas de Lavoisier sobre la revivificación, volver a los procesos de purificación planteados por Agrícola y observar la concepción de la acción química de la luz planteada por Bunsen y Roscoe, permitió articular una mirada en la que la ciencia se compromete desde su génesis como una forma humana de mirar, de transformar y de comprender la naturaleza.

La cámara estenopeica y el proceso de revelado fotográfico se consolidaron en esta investigación como un eje fundamental que logró conectar la luz con las reacciones químicas, la historia con la experiencia y la observación con la comprensión. En cada uno de los montajes realizados la luz funcionó como un agente transformador que permitió observar los procesos de reducción de los haluros de plata a plata metálica en el papel fotográfico. Esta transformación en el papel no solo logra poner en evidencia una reacción química, sino que también propone una metáfora epistemológica, en donde la luz que revela la imagen latente en el papel, es la misma que revela el conocimiento en el aula. En el juego de luces y sombras, los estudiantes y el docente observan cómo la materia cambia de la misma manera como cambia su comprensión del fenómeno.

De acuerdo con los propósitos y proyecciones de la investigación, la revisión histórica permitió establecer criterios para comprender la oxidación y la reducción más allá del lenguaje de los electrones, rescatando su dimensión fenomenológica. Los montajes experimentales fueron diseñados desde algunos criterios que posibilitaron crear algunas condiciones reales para observar los fenómenos tal como fueron vistos por los experimentadores en su momento, acercando la historia al presente en el aula. Con la construcción de la ruta metodológica se pudo hacer una articulación entre la historia, la experimentación y la reflexión conceptual que permitió fortalecer

la experiencia formativa en la enseñanza de la química que mostró un proceso vivo, sensible y creativo.

Por último, este proceso investigativo permitió ver que la experimentación en el aula de clase no debe limitarse a la simple reproducción de los procedimientos ya establecidos, sino que, debe generar una reflexión, tanto en el docente como en los estudiantes. Como opinión personal, cada uno de los experimentos, cada uno de los montajes y cada una de las observaciones confrontaron mi práctica actual como educador de ciencias naturales. Comprendí que enseñar ciencias naturales implica interpretar, no solo demostrar; implica acompañar el proceso de conocimiento en los estudiantes, no solo evaluar el resultado. La luz responsable de la transformación del papel fotográfico no solo transformó al papel, sino que también transformó mi manera de mirar la enseñanza de las ciencias, recordándome que el conocimiento científico, de la misma manera que en la imagen revelada, solo se hace visible cuando la reflexión y la experiencia se encuentran.

BIBLIOGRAFÍA

- Agrícola, G. (1556). De Re Metallica Libri XII. Basilea: Froben.
- Bachelard, G. (1938). La formación del espíritu científico. México: Siglo XXI.
- Bunsen, R., y Roscoe, H. E. (1857). Photo-chemical research. Part I, Part II and Part III, Measurement of the chemical action of light. Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
- Boyle, R. (1664). The experimental history of colours (M. Hunter y E. Davis, Eds.). Cambridge University Press. (Trabajo original publicado en 1664).
- Gil, D., y Valdés, P. (1996). La orientación de las prácticas de laboratorio como investigación: un ejemplo ilustrativo. Enseñanza de las Ciencias, 14 (2), 155 - 163.
- Hacking, I. (1983). Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hodson, D. (1993). Reconstructing the relationship between science and technology in science education. Research in Science Education, 23 (1), 1 - 17.
- Holmes, F. L. (1985). Lavoisier and Chemistry of Life: An Exploration of Scientific Creativity. Madison: University of Wisconsin Press.
- Ilford Photo. (2003). Processing your first black and white film: A step - by - step guide to film processing in small tanks for hobbyists, students and schools (Octubre 2003). Recuperado de: https://www.ilfordphoto.com/wp/wp-content/uploads/2017/04/Processing-your-first-black-and-white-film.pdf?utm_source=
- Latour, B., y Woolgar, S. (1995). La vida en el laboratorio: la construcción social de los hechos científicos. Madrid: Alianza Editorial.
- Lavoisier, A. (1993). Tratado elemental de química (F. Campos López y J. Frías Sánchez, Trads.). Madrid: Alianza Editorial. (Trabajo original publicado en 1789).
- Mach, E. (1890). La mecánica: Exposición histórica y crítica de su desarrollo. Madrid: Alianza Editorial (Versión castellana de 1980).
- Malagón Sánchez, J. F., Ayala Manrique, M. M., Sandoval Osorio, S., García Arteaga, E. G., Marín Quintero, M., Flórez Rojano, I. D., Gómez Estrella, A. L., Ramírez Acosta, M. H., y

- Barragán Orjuela, Y. V. (2011). El experimento en el aula: comprensión de fenomenologías y construcción de magnitudes. Bogotá: Fondo Editorial Universidad Pedagógica Nacional.
- Master Organic Chemistry. (2013). Initiation, propagation, termination. Disponible en: <https://www.masterorganicchemistry.com/2013/09/06/initiation-propagation-termination/>.
- Romero Chacón, A. E. (2002). La experimentación y su rol en la construcción del conocimiento: elementos para propuestas didácticas. Universidad de Antioquia.
- Romero Chacón, A. E., y Rodríguez, C. (2006). La experimentación en el aula de ciencias: reflexiones epistemológicas y pedagógicas. Revista Educación en Ciencias, 10 (2), 45 - 59.
- Stroebel, L. (2000). Basic photographic materials and processes (2nd ed.). Focal Press.
- Titanium. 2024. Reflector LED tipo tableta de 200W con control de cinco intensidades y emisión de luz de colores blanco, rojo, verde y azul. Especificaciones técnicas. Titanium iluminación.
- UNI-T. (s.f.). UT383BT Mini Light Meter with Bluetooth User Manual. UNI-TREND Technology (China) Co., Ltd. Recuperado de: <https://uni-trend.com>