

Universidad Nacional Autónoma de  
México

Facultad de Filosofía y Letras  
Programa de Maestría y Doctorado en  
Pedagogía



MODIFICACIÓN DE IDEAS PREVIAS  
DEL DESARROLLO HISTÓRICO DEL  
CONCEPTO DE COEFICIENTE DE  
DIFUSIÓN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN PEDAGOGIA

PRESENTA:

SAMUEL KUPERSTEIN  
APORTELA



DIRECTORES DE TESIS:

Dra. MARÍA CONCEPCIÓN BARRÓN TIRADO

Dr. BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. María Concepción Barrón Tirado y al Dr. Bernardo Hernández Morales, ya que gracias a su apoyo y confianza incondicionales pude ingresar a este Programa de Maestría y Doctorado en Pedagogía y culminarlo exitosamente.

A la Dra. Raquel Glazman Nowalski y a la Dra. Martha Corenstein Zaslav por introducirme al mundo del pensamiento crítico y de la investigación cualitativa.

Al Mtro. Antonio Huerta Cerdán por aceptar ser lector y crítico de este trabajo.

A todos mis maestros con los que tuve el privilegio de tomar clase y ayudaron a mi formación.

Al personal administrativo del Departamento de Pedagogía de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM por todas sus atenciones.

A mi esposa Leah por su paciencia, sugerencias e insistencia por que concluyera todo el proceso de maestría, pero sobre todo, por su siempre entrañable compañía.

Dedico este trabajo a mis hijos Dani y Yael con el deseo de que siempre logren lo que se propongan, y les agradezco la paciencia que me tienen.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	3
OBJETIVOS .....	4
HIPÓTESIS .....	4
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO .....	5
1.1 Ideas Previas .....	5
1.2 Cambio Conceptual .....	9
1.3 Constructivismo .....	15
1.4 Modelos Conceptuales .....	24
CAPÍTULO 2. CONTEXTUALIZACIÓN Y METODOLOGÍA.....	32
2.1 Contexto.....	32
2.2 Metodología .....	34
2.3 Instrumentos .....	35
2.4 Población estudiada .....	36
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	37
CONCLUSIONES .....	64
BIBLIOGRAFÍA .....	67
ANEXO 1 .....	74
ANEXO 2 .....	78
ANEXO 3 .....	97
ANEXO 4 .....	98

## INTRODUCCION

Esta investigación trata el efecto que tiene la inclusión de temas referentes a la historia de la ciencia y tecnología en la remoción de ideas previas en un concepto fundamental a saber: el desarrollo histórico del concepto de coeficiente de difusión, en los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química Metalúrgica de la UNAM.

Este proyecto surgió principalmente por dos motivos derivados de las observaciones de un grupo de profesores del Departamento de Ingeniería Metalúrgica perteneciente a la Facultad de Química de la UNAM: el primero, sobre el hecho de que la mayoría de los alumnos que ingresan, e incluso egresan, de la asignatura Transporte de Masa, no tienen conocimiento del desarrollo histórico del concepto mencionado; el segundo, sobre el hecho de que al utilizar las ecuaciones relacionadas con el coeficiente de difusión, los alumnos frecuentemente no saben interpretar correctamente la información obtenida.

La falta de investigaciones pedagógicas en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica está obstaculizando la utilización de técnicas pedagógicas modernas que permitan fusionar de una manera real, práctica y concreta los mundos de la ingeniería y la pedagogía en beneficio de los estudiantes; además, al ser este proyecto una investigación pionera en su género, se busca proporcionar información adicional a docentes de las asignaturas afines.

A partir de las investigaciones existentes y de mi experiencia como docente y alumno, pienso que la inclusión de temas como la historia de la ciencia en nuestra formación académica, ayudará a transformar las ideas preconcebidas que tienen los estudiantes sobre el desarrollo histórico de varios conceptos, entre ellos el del coeficiente de difusión.

## **OBJETIVOS**

Los objetivos buscados en este trabajo son:

- a) Identificar las ideas previas de los estudiantes acerca del desarrollo histórico del concepto del coeficiente de difusión.
- b) Desarrollar una metodología para remover esas ideas previas (en caso de comprobar su existencia).
- c) Evaluar, cualitativamente, el cambio conceptual correspondiente.

Los resultados contribuirán a proporcionar soluciones (o al menos recomendaciones) a los profesores que imparten la asignatura de Transporte de Masa, así como a los que imparten asignaturas afines. La investigación proporcionará nuevas formas de interpretar el desarrollo de los conceptos, dando pautas a nuevas creencias y valores. Ofrecerá, por tanto, vías para transformar y mejorar la práctica educativa.

## **HIPÓTESIS**

La inclusión de una perspectiva histórica del desarrollo del concepto de coeficiente de difusión en la asignatura “Transporte de Masa” ayudará a modificar las ideas previas que sobre dicho desarrollo tienen los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química Metalúrgica de la UNAM además de percibir los avances de la ciencia y la tecnología como parte de un proceso histórico y no como un conjunto de hechos aislados.

# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Ideas previas

Un problema bastante común que enfrentamos los profesores de asignaturas de corte científico en el aula es el de lograr un cambio conceptual, es decir, el de transformar las llamadas ideas previas o concepciones espontáneas que tienen los alumnos hacia el conocimiento científico. Así como en la literatura especializada, en el presente trabajo por ideas previas se entiende a aquellas que son incorrectas desde un punto de vista científico, están basadas en la experiencia cotidiana y en la capacidad de observación del sujeto. Lo anterior ha promovido un creciente nivel de investigaciones tanto en esta línea, como en la del papel del profesor en el aula, por ejemplo, Carey(1991), Coll(1990), Flores(2003), Pozo(1999), Vosniadou(1994), por mencionar algunas.

Carretero (2002: 24) señala algunas características de las ideas previas:

- 1) Son específicas de dominio, y con frecuencia, dependen de la tarea utilizada para identificarlas.
- 2) La mayoría de estas ideas no son fáciles de identificar porque forman parte del conocimiento implícito del sujeto.
- 3) Son personales.
- 4) Muchas de ellas están guiadas por la percepción y experiencia del alumno en su vida cotidiana.
- 5) No tienen todas el mismo nivel de especificidad/generalidad, y por lo tanto, las dificultades de comprensión que ocasionan a los estudiantes no son igual de importantes.
- 6) Con frecuencia, estas ideas son muy resistentes y, consecuentemente, difíciles de modificar.
- 7) Tienen un grado de coherencia y solidez variable: pueden constituir representaciones difusas y más o menos aisladas o bien pueden formar parte de un modelo mental explicativo con cierta capacidad de predicción. Es decir, va a depender si se considera el conocimiento conceptual en forma fragmentaria o si se considera como integrador de la información en modelos mentales coherentes.

El problema de las ideas preconcebidas, si bien ha cobrado un mayor interés en las investigaciones actuales cuenta con varios antecedentes, por ejemplo, Bachelard (2000: 27) señala como primer obstáculo del conocimiento científico a la experiencia básica, definiéndola como “la experiencia colocada por delante y por encima de la crítica, que, ésta sí, es necesariamente un elemento integrante del espíritu científico” entendiéndose al sujeto como el espíritu científico.

Vygotsky (1986: 154-155) al señalar algunas de las consideraciones que lo llevaron a separar los conceptos científicos de los cotidianos para un estudio comparativo dice:

El desarrollo de los conceptos espontáneos no conoce la sistematicidad y se remonta de los fenómenos hacia las generalizaciones. [...] la naturaleza misma de los conceptos científicos suscita su uso deliberado, siendo ésta su ventaja sobre los conceptos espontáneos [...] el estudio de los conceptos científicos tiene, por sí mismo, consecuencias importantes para la educación y la instrucción. Dichos conceptos no se asimilan tal cual, y la enseñanza y el aprendizaje juegan un papel importante en su adquisición.

Ausubel (1980: 388) define los preconceptos como “los falsos conceptos folclóricos o idiosincráticos en el alumno que inhiben el aprendizaje y la retención de conceptos y principios científicos”. Como podemos observar, también relaciona los preconceptos con el proceso de enseñanza-aprendizaje considerándolos falsos desde un punto de vista científico, y más adelante agrega: [...] son resistentes a la extinción y se afianzan a otras ideas preconcebidas muy estables y relacionadas y de naturaleza más inclusiva [...], es decir, funcionan como los conceptos científicos sólo que los preconceptos son falsos pues carecen de sistematicidad y son poco específicos.

Piaget (2004: 234), a diferencia de Ausubel, considera a los preconceptos como pre-científicos, es decir, como conocimientos previos y necesarios en el proceso evolutivo para la construcción del conocimiento científico. Además señala que su interpretación está relacionada con la postura de Bachelard al expresar lo siguiente:

En efecto, G. Bachelard considera una “ruptura” total entre las concepciones precientíficas y científicas, al mismo tiempo que identifica como el mayor “obstáculo epistemológico” al irracionalismo precientífico. Nosotros creemos, por una parte, que hay una mayor

continuidad entre el pensamiento precientífico y el científico, en tanto los mecanismos en juego en el proceso cognoscitivo son los mismos; y, por otra, consideramos que hay un cierto tipo de “ruptura” *cada vez* que se pasa de estadio al otro, tanto en la ciencia como en la psicogénesis. Podemos aceptar sin dificultad que se trata de una ruptura, pero en el sentido de un cambio de marco epistémico.

Kuhn (1962: 234) destaca la influencia del contexto y, en especial, el factor histórico en el cambio conceptual y en la construcción de conceptos, señalando que dentro de la enseñanza de las ciencias este casi no se toma en cuenta y, cuando sí, se nos muestra a la historia de la ciencia como una mera acumulación de hechos y teorías vigentes dentro de lo que él llamó un paradigma, y no como un proceso que conlleva factores sociales, políticos y económicos. Él señala, refiriéndose a los libros de texto, lo siguiente:

(...) aluden tan sólo a aquellas partes del trabajo de los científicos del pasado que puedan verse fácilmente como contribuciones al planteamiento y solución de los problemas paradigmáticos del texto. En parte por selección y en parte por distorsión, los científicos de épocas pasadas se presentan implícitamente como si hubiesen trabajado en el mismo conjunto de problemas fijos y de acuerdo con el mismo conjunto de cánones fijos que se antojan como científicos según la más reciente revolución de la teoría y el método de la ciencia.

Al respecto Gil Pérez y Guzmán Ozámiz (2001: 33) dicen:

(...)pero más grave que ésta transmisión directa de concepciones incorrectas, es la visión que se transmite del trabajo científico: los conceptos son introducidos de forma aproblemática, es decir, sin referencia a los problemas que condujeron a su construcción (Otero, 1985), ni detenerse en los conflictos de ideas que el tratamiento de esos problemas generó.

Feyerabend (1999: 110) por su parte menciona la manera de entender el proceso de desarrollo de la ciencia y sus métodos: “(...) la historia de las ideas es un constitutivo esencial de la investigación científica (...) y hace una crítica a la forma en que se da la educación científica”:

Tal educación simplifica la “ciencia” simplificando a sus participantes: en primer lugar se define un dominio de investigación. A continuación, el dominio se separa del resto de la historia y recibe una “lógica” propia. Después, un entrenamiento completo en esa lógica condicionada a quienes trabajan en dicho dominio. Con ello se consigue que sus acciones sean más uniformes y al mismo tiempo se congelan grandes partes del proceso histórico. “Hechos” estables surgen y se mantienen a pesar de las vicisitudes de la historia. En: Feyerabend (2003: 3).

Sánchez (2002: 26-31) hace un análisis del conocimiento “lego” (no científico), señalando otros nombres para este tipo de conocimiento que diversos autores han acuñado junto con sus características y significados. Así, menciona las “concepciones de anclaje”, término acuñado por Clement, Brown y Zietsman, para referirse a aquel tipo de conocimiento que los estudiantes tienen, siendo utilizados como anclas para ser ampliados y profundizados si están cercanos a los modelos científicos. Si las concepciones del estudiante no son cercanas a los modelos científicos, se parte de éstas y se le proporciona una concepción análoga a la científica para que sirva como ancla y pueda compararla con la concepción original que tenía. Es decir, dicho término es análogo al de las preconcepciones ya que alude a conocimientos intuitivos, pero además, es utilizado para promover un cambio conceptual.

Sánchez (2002: 32-34) también explica el significado del término “teorías implícitas” acuñado por Rodrigo(1985). Este término se refiere a las teorías que construye una persona común para interactuar y darle significado al mundo que la rodea; tiene el estatus de una teoría ya que está conformado por un conjunto de conceptos relacionados entre sí, pero en donde existen incoherencias entre los elementos que constituyen la teoría desde una perspectiva científicista, ya que para la persona lego, estas teorías son coherentes.

Dicho término es similar al de “constructo alternativo” ya que también es formulado por los sujetos para explicarse el mundo y hacer predicciones, sólo que estas predicciones son contrastadas con la experiencia, y si la contrastación no resulta satisfactoria, el sujeto formulará otro constructo alternativo que resista la contrastación.

Finalmente, Sánchez (2002: 35) define al término “modelo mental” como “una representación del conocimiento que permitirá superar la discusión sobre las distintas connotaciones dadas al conocimiento lego del alumno” ya que la identificación, explicación y confrontación de las ideas previas de los alumnos quedan incluidas bajo el “modelo mental”.

Lo anterior nos da una perspectiva más o menos general de la multiplicidad de enfoques y resultados que han tenido los estudios sobre las preconcepciones y los cambios conceptuales, abarcando los intentos por explicar sus orígenes, así como algunos factores de origen epistémico y de historia de la ciencia para

provocar un cambio conceptual. Cabe señalar, como lo mencionan Gil y Ozámiz (2001: 27), “que el asunto de los errores conceptuales no se limita únicamente a los estudiantes, sino también, a un elevado porcentaje de profesores”. Es decir, se hace patente la necesidad de mantener cursos de actualización para que el profesorado esté suficientemente preparado para enfrentar los nuevos retos educativos, por lo menos dentro del área de asignaturas científicas.

Por su parte Costamagna (2005) señala que las ideas previas son tan persistentes que no sólo estudiantes, sino también profesionistas, mantienen concepciones erróneas sobre fenómenos científicos y añade lo dicho por Campanario y Otero (2000), quienes dicen:

Los alumnos mantienen sus esquemas previos, ya que los conocimientos científicos que aprenden les son sólo útiles en el medio académico para aprobar los exámenes tradicionales y no los integran en su esquema cognitivo para comprender los hechos de su entorno, por lo que los olvidan fácilmente. En cambio, su arsenal de ideas previas les es útil para explicar la realidad y para interactuar con el medio que los rodea. En: Costamagna (2005: 421).

## 1.2 Cambio conceptual

Costamagna (2005: 420) aborda el problema de la comprensión en la enseñanza tanto desde la función docente como del estudiante y rescata lo señalado por Perkins (1992) quien dice:

Se podrían identificar dos grandes deficiencias en cuanto a los resultados de la educación: el “conocimiento frágil” ( los estudiantes no recuerdan, no comprenden o no usan activamente gran parte de lo que supuestamente han aprendido) y el “conocimiento pobre” ( los alumnos no saben pensar valiéndose de lo que saben).

Refiriéndose a la acción docente Costamagna (2005: 420) señala lo siguiente:

Una enseñanza centrada en la comprensión implica en el momento de planificar la organización de los contenidos, la selección de temas centrales ricos en ramificaciones y derivaciones didácticas que posibiliten a los alumnos establecer mayores procesos de relación e integración.

Por su parte Martínez (2007), destaca la diferencia entre entendimiento y conocimiento. En términos generales plantea que entendimiento es lograr

situar un evento respecto a las normas propias de las prácticas de las que forman parte, mientras que conocimiento es un logro permanente que no depende del entorno normativo en el cual se genera.

Las investigaciones en la formación de conceptos enfocada a la enseñanza de las ciencias, han puesto especial atención en desarrollar modelos que permitan la interpretación de los problemas de aprendizaje de los conceptos científicos. Flores (2003: 121) señala que “la mayoría de estos modelos tienen su origen en teorías cognoscitivas provenientes de tres vertientes: la psicología cognoscitiva, la psicología genética y la epistemología”.

La hipótesis básica de la psicología cognoscitiva es que existe una correspondencia entre los procesos cognoscitivos de los sujetos y los que se establecen con las computadoras. Ha surgido en torno a la noción de “inteligencia artificial”, y aparte de proporcionar en forma general una representación de la construcción de los modelos cognoscitivos, desarrolla modelos sobre los procesos del conocimiento científico.

Uno de los principales exponentes de la teoría cognoscitiva ha sido David Ausubel, quien a partir de la década de 1960 desarrolló sus ideas acerca del aprendizaje significativo. Con respecto a la teoría de Ausubel, Díaz-Barriga (2002: 35) comenta:

[...] postula que el aprendizaje implica una reestructuración activa de las percepciones, ideas, conceptos y esquemas que el aprendiz posee en su estructura cognitiva. [...] Ausubel concibe al alumno como un procesador activo de la información haciendo que el aprendizaje sea sistemático y organizado, y no como un procesador de simples asociaciones memorísticas. Aunque esta concepción señala la importancia que tiene el aprendizaje por descubrimiento (dado que el alumno reiteradamente descubre nuevos hechos, forma conceptos, infiere relaciones, genera productos originales, etcétera), considera que no es factible que *todo* el aprendizaje significativo que ocurre en el aula deba ser por descubrimiento. Antes bien, este autor propugna por el aprendizaje verbal significativo, que permite el dominio de los contenidos curriculares que se imparten en las escuelas, principalmente a nivel medio y superior.

La psicología genética se sustenta en la concepción evolutiva de estructuras cognoscitivas que se construyen de esquemas operacionales concretos y abstractos. En ésta se destaca la importancia de los sistemas externos de representación, tanto como medios de exteriorizar ideas previas, como medios

que permiten crear nuevos modelos, es decir, capaces de una doble función. Bajo esta perspectiva psicológica, se considera que el proceso del cambio conceptual obedece a un perfil y no es algo que ocurra instantáneamente, Martí, E. y García-Mila plantean lo siguiente:

La resistencia al cambio de los primeros conocimientos consiste en apelar a la existencia de módulos conceptuales innatos productos de un desarrollo filogenético que ha modelado la mente humana para atender y representar los diferentes dominios de conocimiento de modo específico. (Martí y García-Mila , 2007: 95)

Desde la perspectiva epistemológica se toma en cuenta el proceso histórico en la construcción de los conocimientos científicos así como en los procesos de construcción y estructuración de las teorías científicas. En este campo, algunos de los trabajos más influyentes son los de Kuhn, Bachelard y Lakatos. Kuhn en su trabajo *La estructura de las revoluciones científicas* (Kuhn, 1962), hace un análisis de la transformación del conocimiento científico planteando que dicha transformación es producto de un proceso de sustitución radical de teorías (revolución científica) que goza del consenso de la comunidad científica. Introduce la noción de inconmensurabilidad cuando propone que un viejo paradigma, es decir, el fundamento o teoría utilizados para interpretar los diferentes fenómenos físicos, son reemplazados por unos nuevos con mayor poder explicativo o predictivo e incompatible con el anterior, ya sea total o parcialmente. Es decir, dos paradigmas se consideran inconmensurables si le asignan a un concepto clave dos significados y métodos de estandarización diferentes. En palabras de Kuhn tenemos lo siguiente:

Lo que ocurre durante una revolución científica no es plenamente reducible a una reinterpretación de datos aislados y estables. En primer lugar, los datos no son inequívocamente estables(...). Más que un interprete, el científico que abraza un nuevo paradigma es como la persona que lleva lentes inversoras. Aunque se enfrenta a la misma constelación de objetos que antes, y sabe que es así, con todo los encuentra transformados completamente en muchos de sus detalles. (Kuhn, 2004: 209-210).

Como se puede apreciar, para Kuhn las teorías científicas son construcciones conceptuales complejas y el papel del investigador es buscar siempre nuevas y mejores explicaciones para los fenómenos naturales, lo que implica mayor comprensión de los mismos. Con base en este análisis se ha establecido una

analogía entre una revolución científica y el cambio conceptual, pues así como en la primera ocurre lo que se llama un cambio de paradigma, en el segundo ocurre un cambio de visión global al romperse con nuestras creencias anteriores en cuanto a conceptos científicos o a su desarrollo se refiere. Es decir, si partimos de la idea de que los conceptos científicos son articulados por medio de representaciones y éstas nos permiten dar interpretaciones o atribuir significados a ciertos procesos o fenómenos específicos, una vez que logramos un cambio conceptual nuestra forma de ver dichos procesos o fenómenos va a ser totalmente diferente puesto que cambia nuestro marco de representación.

Bachelard, a diferencia de Kuhn, analiza el problema con base en el sujeto y afirma que el avance en el conocimiento científico requiere de una constante negación del conocimiento anterior, pues el desarrollo de nuevos conceptos involucra nuevas formas de ver los fenómenos, y establece lo siguiente:

El espíritu científico sólo puede constituirse destruyendo el espíritu no científico. Harto a menudo el hombre de ciencia se confía a una pedagogía fraccionada, mientras que el espíritu científico debería tender a una reforma subjetiva total. Todo progreso real en el pensamiento científico necesita una conversión. Los progresos del pensamiento científico contemporáneo determinaron transformaciones hasta en los propios principios del conocimiento. (Bachelard, 2003: 11).

Bachelard señala que para que se verifique la reforma subjetiva, es necesario que el investigador (lo que denota como “espíritu científico”) supere una serie de obstáculos epistemológicos que están asociados tanto a problemas del aprendizaje de los conocimientos científicos como a las ideas previas, reconociendo que estas últimas no desaparecen, sino que siempre están presentes en el investigador. Esto implica que para un solo investigador existen múltiples representaciones de un mismo concepto o proceso que se irán activando dependiendo del contexto en que se encuentre, y acuña el término “perfil epistemológico” para referirse a estas. Puntualiza:

En resumen, hay que convocar a todos al pluralismo de la cultura filosófica. En tales condiciones, nos parece que una psicología del espíritu científico debería dibujar lo que llamaremos el *perfil epistemológico* de la diversas conceptualizaciones. Mediante un perfil mental, así se podría medir la acción psicológica efectiva de las diversas filosofías en la obra del conocimiento. (Bachelard, 2003: 37).

Lakatos (2002) por su parte, explica el desarrollo del conocimiento científico desde otro punto de referencia, es decir, a través de lo que denomina *programa de investigación*, expresando lo siguiente:

Mi exposición implica un nuevo criterio de demarcación entre ciencia madura, que consiste en programas de investigación, y ciencia inmadura, que consiste en una remendada secuencia de ensayos y errores... La ciencia madura consiste en programas de investigación que anticipan no sólo hechos nuevos sino también, y en un sentido importante, teorías auxiliares nuevas. ( Lakatos, 2002: 116-117).

Posteriormente explica qué debemos entender por programas de investigación de la siguiente manera:

La unidad básica para la evaluación no debe ser una teoría aislada o una conjunción de teorías, sino un programa de investigación con un núcleo firme convencionalmente aceptado ( y por tanto, irrefutable por decisión provisional) y con una heurística positiva que define los problemas, esboza la construcción de un cinturón de hipótesis auxiliares, prevé anomalías y victoriosamente las transforma en ejemplos según un plan preconcebido. ( Lakatos, 2002: 144-145).

Una vez definido el concepto de *programa de investigación* nos explica cuándo sucede una sustitución de teoría:

En el seno de un programa de investigación, una teoría sólo puede ser desplazada por otra teoría mejor; esto es, por una que tenga un exceso de contenido empírico con relación a sus predecesoras, parte del cual resulta posteriormente confirmado. Y para que se produzca la sustitución de una teoría por otra, ni siquiera es necesario que la primera haya sido refutada en el sentido popperiano del término. Por tanto, el progreso se caracteriza por incidencias verificadoras de un exceso de contenido en lugar de incidencias refutadoras. (Lakatos, 2002: 147).

Como podemos notar, en el modelo de Lakatos no está considerada la inconmensurabilidad de teorías, sino más bien, es por medio de criterios de justificación con lo que se explica el cambio conceptual.

Por otro lado tenemos la perspectiva semiótica, la cual se enfoca en el discurso escolar interpretando los problemas de la enseñanza y aprendizaje en términos de negociación de los conocimientos, argumentaciones y

significados compartidos, es decir, el aprendizaje de las ciencias es un asunto de “aprender cómo hablar ciencia, lo que requiere las mismas habilidades lingüísticas que cualquier otra disciplina” (Castorina, 1998, p. 24). Desde este modelo también se explican varios sistemas como la genealogía de los conceptos (Carnap, 1988), generación de axiomas, sistemas deductivos, sistemas de signos lógicos que proporcionan la descripción, explicación y pronósticos de la teorías científicas.

Lemke (1997: 46) señala que tanto “el aprender y el enseñar como el hacer ciencia son principalmente procesos sociales. Los significados complejos se comunican fundamentalmente por medio del lenguaje entre las comunidades”. De modo que la educación científica consiste en “enseñar a usar el lenguaje según los patrones semánticos de la ciencia, de modo flexible y para sus propios propósitos, en clase, en los exámenes, al llegar a la solución de un problema”. Sugiere a los profesores que atiendan las interrogantes de los alumnos, sus informes individuales y las discusiones grupales, enseñarles cómo usar el lenguaje científico, interpretando sus ideas previas y discutiéndolas en conjunto, es decir, los docentes deben ayudar a los alumnos a entender que las observaciones dependen del lenguaje utilizado en alguna teoría.

El término cambio conceptual fue introducido por Thomas Kuhn (1962) para indicar que el significado de los diferentes conceptos pertenecientes a una teoría científica cambian cuando la teoría cambia. Es decir, al haber un nuevo paradigma o marco teórico de referencia, el significado de los conceptos subsumidos dentro del viejo paradigma se vuelven inconmensurables con el significado de los mismos conceptos dentro del nuevo marco de referencia. Es a partir de esta idea que se definió el cambio conceptual en su concepción clásica, es decir, que el aprendizaje de las ciencias consiste en la mera sustitución o reemplazo de las ideas previas por conceptos que gozan de validez científica dentro del paradigma vigente. Sin embargo, las investigaciones han mostrado que lograr un cambio conceptual no es tan simple como podría parecer a simple vista, es decir, no basta con mostrar a los estudiantes sus errores conceptuales, para que dichos errores sean sustituidos por conceptos científicos.

A lo largo de la historia podemos constatar que el tema del aprendizaje ha gozado de gran interés, incluso se ha constituido en un campo específico de conocimiento, se han elaborado varias teorías al respecto, y tal como otras disciplinas, se ha servido de otros campos para su desarrollo. Sin embargo, este desarrollo había sido incipiente ya que las teorías que intentaban explicar el proceso de aprendizaje no lograban hacerlo en forma totalmente clara o explícita, sobre todo, cuando se trataba de dominios específicos. No es sino hasta épocas relativamente recientes que se han hecho aportaciones más finas o con mayor poder explicativo, principalmente, porque se logró articular a las teorías del conocimiento provenientes de la epistemología y de la psicología con el aprendizaje, es decir, campos que estaban desvinculados dejaron de estarlo en el momento en que se les concibe como parte del proceso de aprendizaje.

Flores (2004: 257) resume las características de los recientes modelos de cambio conceptual de la siguiente manera:

- a) El aprendizaje es conceptualizado como un proceso de cambio conceptual.
- b) El cambio conceptual es un proceso mental del sujeto.
- c) Es un proceso complejo que implica la transformación de diversos aspectos conceptuales y/o cognitivos del sujeto, y
- d) Es un proceso que requiere de un tiempo no especificado, pero, en todo caso, no inmediato así como del reconocimiento o conciencia del sujeto de las condiciones para el cambio.

Como podemos apreciar, la idea de ver al cambio conceptual como un simple reemplazo o acomodación de conceptos tiende a transformarse en una teoría del aprendizaje donde se involucran procesos y estructuras cognitivas.

### 1.3 Constructivismo

Bajo los enfoques cognoscitivos, de acuerdo con Matthews (1994), la psicología genética y más recientemente la epistemología, son las disciplinas que han producido mayor cantidad de investigaciones. Dentro de la psicología genética se encuentra el constructivismo que siendo un enfoque que permite entender cómo se construye el conocimiento y proponer procesos activos en la construcción del mismo, resulta ideal para el estudio de las ideas previas y el cambio conceptual; Flores (2000: 30) al respecto expresa lo siguiente:

El constructivismo es un enfoque que acoge de manera natural al problema de las ideas previas y al del cambio conceptual. De hecho las investigaciones en estos campos han permitido que el constructivismo haya logrado un status muy importante en la enseñanza e investigación, además ha dado origen a diversas aproximaciones para ponerlo en práctica en las escuelas, aspecto que, en épocas anteriores, como los sesenta, se limitaba a las afirmaciones de “aprender a aprender”, “aprender haciendo”, etcétera, pero que siempre dejaron abierto el problema de cómo lograr llevar al aula esos planteamientos.

El constructivismo contiene dos tradiciones importantes: el constructivismo psicológico y el constructivismo sociológico. La primera abarca la psicología y epistemología genéticas; fue desarrollada por Piaget y sus colaboradores en las décadas de los 1950 y los 1970. Esta teoría del desarrollo del conocimiento y de los procesos cognoscitivos, fundamenta al sujeto como constructor del conocimiento a partir de su interacción con la realidad, así como de los mecanismos para interpretarla; esa construcción es un proceso que el sujeto va elaborando en forma evolutiva o genética. Es decir, es un proceso de construcción intelectual personal e individual que surge de la actividad del sujeto en el mundo. A su vez el constructivismo psicológico se bifurca en dos corrientes: por un lado la Piagetiana, y por el otro, la de Vygotsky y sus seguidores, quienes subrayan la importancia del lenguaje para la construcción cognitiva de los individuos.

Para Piaget y García (2004: 227) el sujeto del conocimiento “es el centro, el que asimila los elementos que le provee el mundo exterior. El sujeto selecciona, transforma, adapta e incorpora dichos elementos a sus propias estructuras cognoscitivas, para lo cual debe construir, adaptar, reconstruir y transformar tales estructuras.” Además, mencionan que no solamente el conocimiento se genera a partir del sujeto, sino que se debe tomar en cuenta a los elementos que constituyen la referencia objetiva del conocimiento, es decir, los objetos, y señalan lo siguiente:

El intermediario entre los objetos y los eventos, por una parte, y los instrumentos cognoscitivos, por la otra, es la acción. La manera en que la acción participa en el proceso cognoscitivo, en la perspectiva que brinda la psicología genética, le da a esta posición epistemológica un sentido preciso que converge con la línea de pensamiento ya clásico en la filosofía dialéctica, pero que le otorga al mismo tiempo una identidad propia dentro de ella, en la medida en que la “práctica” es analizada en términos de acciones que la constituyen y que

aparecen como factores esenciales en el punto de partida del proceso cognoscitivo (p.228).

Estos dos autores van más allá cuando dicen que a medida que el entorno social del niño se vuelve más rico y su lenguaje se complementa, la experiencia directa de los objetos dependerá de los significados que le dé el medio social. Es aquí donde la historia de la ciencia se utiliza para mostrar cómo el medio social influyó sobre el proceso cognoscitivo. El aporte fundamental de la revolución científica del siglo XVII es que reformuló los problemas que eran objeto de estudio científico. Los mismos autores al hablar acerca de la historia de la física señalan:

La revolución de la mecánica no se produjo por el hallazgo de nuevas respuestas a las preguntas clásicas sobre el movimiento, sino por el hallazgo de nuevas preguntas que permitieron formular los problemas de manera distinta. Las nuevas formulaciones permitieron, a su vez, un tratamiento matemático del problema y la concepción de situaciones experimentales en las cuales las soluciones eran verificables o refutables. Es desde esta perspectiva que nosotros caracterizamos la revolución científica como un cambio de "marco epistémico". (p.230).

Para que las teorías científicas fueran desarrolladas, fue necesario que los esfuerzos se concentraran en el estudio de los fenómenos de ciertos problemas o utilizando algunos equipos o métodos de observación. Esto se debió a dos causas principales: a la misma necesidad de los investigadores por entender los fenómenos y al reclamo de la sociedad que buscaba soluciones a los problemas de carácter práctico, como por ejemplo, la industria militar que requería de respuestas a la creación de nuevo armamento. Al respecto Piaget y García comentan:

Un gran sector del conocimiento científico se va pues expandiendo no de manera estrictamente racional, en respuesta a una problemática interna, sino de manera un tanto arbitraria y por un conjunto de impulsos orientados por requerimientos externos impuestos por la sociedad. (p. 230).

Otra manera en que se han dado descubrimientos científicos ha venido del azar o de avances logrados en otras ramas de las ciencias, por ejemplo, el desarrollo en las matemáticas ha permitido el tratamiento de problemas físicos.

Piaget y García (2004) mencionan que “la naturaleza asimiladora del conocimiento contradice al empirismo, se impone una epistemología constructivista, ya que un esquema se construye a partir de los precedentes, asimilar equivale a estructurar” (p.247). De acuerdo con esto, en el proceso de aprendizaje tanto los mecanismos de abstracción como los de generalización son empleados, pero a estos, la asimilación les da un sentido más rico. Esto es porque la asimilación resalta los esquemas que son creados por el sujeto y los contenidos que va a estructurar. Existen dos formas de abstracción: la “abstracción empírica” que se refiere a los objetos exteriores al sujeto, comprueba ciertas propiedades para extraerlas y analizarlas independientemente; la segunda abstracción es la que se encuentra en la física o en las matemáticas, la “abstracción refleja o reflexiva”, que se refiere a las acciones y operaciones del sujeto y a los esquemas que le conduce a construir. Esta abstracción es reflexiva porque hace pasar lo abstraído de un plano inferior a uno superior y también provoca una reflexión porque permite una reorganización sobre el nuevo plano de lo que ha sido extraído del plano precedente.

En física, hay una alternancia continua entre la abstracción empírica, que se ejerce sobre los contenidos, y la reflexiva que extrae de las formas anteriores los elementos para construir nuevas formas adaptadas a dichos contenidos. En matemáticas, por el contrario, donde es el sujeto quien elabora a la vez formas y contenidos (o, si uno prefiere, donde todo es ya “forma” antes de devenir contenido), la abstracción reflexiva es naturalmente la única que opera, aun en los casos de una operación que es utilizada solamente a título instrumental para dar lugar sólo posteriormente a una tematización que permita construir una nueva teoría. (Piaget, 2004: 248).

En resumen, la abstracción reflexiva extrae su contenido de las acciones del sujeto y va a representar a las actividades constructivas del mismo.

Siguiendo a Piaget y García, tanto la abstracción como la generalización van a originar dos procesos, el primero es la “búsqueda de razones” que justifiquen a estos mecanismos, señalando que toda mente científica está en esta búsqueda. El segundo proceso es el movimiento que provoca un equilibrio dinámico entre las asimilaciones y acomodaciones junto con las integraciones y las diferenciaciones muy utilizado tanto en la física como en las matemáticas.

Otro proceso muy visible en el constructivismo matemático es el pasaje de una fase anterior donde algunas operaciones desempeñan un papel instrumental sin tomar conciencia suficiente, hacia otra fase donde estas mismas operaciones van a dar lugar a nuevas teorías (hay varios ejemplos en el álgebra).

Piaget y García (2004: 251) concluyen que: “la ambición permanente de la epistemología genética ha sido mostrar que el desarrollo espontáneo de los conocimientos extrae su fuente de las organizaciones biológicas para llegar en sus etapas avanzadas a la construcción de las estructuras lógico-matemáticas.”

Bajo esta perspectiva, Vosniadou (1994) ha desarrollado un modelo en el que describe dos tipos de cambio en la estructura de conocimiento y que consideran un cambio conceptual: el enriquecimiento y la revisión. El primero se caracteriza por la mera incorporación de nueva información a la ya existente, y que podría entenderse en términos del mecanismo de asimilación Piagetiano. La revisión surge cuando la nueva información entra en contradicción con la ya existente, lo que hace necesario una transformación de estructura cognitiva a nivel teórico. Este cambio producido repercutirá en el modelo mental adoptado por el sujeto, pudiéndose relacionar con el mecanismo de acomodación propuesto por Piaget.

El planteamiento sociocultural de Vygotsky se refiere a “explicar cómo se ubica la acción humana en ámbitos culturales, históricos e institucionales” (En Díaz-Barriga, 2002: 29). Esta teoría analiza la acción humana mediada por herramientas como el lenguaje. Las tradiciones culturales y las prácticas sociales son las que van a regular, transformar y dar expresión al psiquismo humano, que va a estar más influido por las diferencias étnicas y culturales que por las características psicológicas del individuo. Por eso refiriéndose al aprendizaje, da gran importancia a la función mediadora del profesor, al trabajo cooperativo y a la enseñanza recíproca entre pares.

Vygotsky (1986: 155) señala algunas de las consideraciones que lo llevan a separar los conceptos científicos de los cotidianos para un estudio comparativo, de la manera siguiente:

El desarrollo de los conceptos espontáneos no conoce la sistematicidad y se remonta de los fenómenos hacia las generalizaciones. La naturaleza misma de los conceptos científicos suscita su uso deliberado, siendo ésta su ventaja sobre los conceptos espontáneos... el estudio de los conceptos científicos tiene, por sí mismo, consecuencias importantes para la educación y la instrucción. Dichos conceptos no se asimilan tal cual, y la enseñanza y el aprendizaje juegan un papel importante en su adquisición.

La segunda tradición importante del constructivismo es el constructivismo sociológico, que se origina con Émile Durkheim y se ha ido enriqueciendo con las aportaciones de sociólogos de la cultura como Peter Berger y, más recientemente, por los sociólogos de la ciencia como Bruno Latour. Esta tradición sostiene que el conocimiento científico se construye y se justifica socialmente, e investiga las circunstancias y la dinámica de construcción de las ciencias. La diferencia de ésta tradición con la de Piaget y Vygotsky, es que ignora los mecanismos psicológicos individuales de construcción de creencias y se enfoca en las circunstancias sociales externas al individuo que, según sostiene esta tradición, determinan dichas creencias individuales.

Aunque en la actualidad existan múltiples variedades de constructivismo (piagetiano, metodológico, empírico, de procesamiento de la información, etc.) todas ellas tienen una concepción del conocimiento humano y, por lo tanto, del conocimiento científico como subjetiva, empirista y personalista. Dentro de la enseñanza de las ciencias los constructivistas han adoptado algunas posturas ontológicas y epistemológicas, todas ellas variantes de la teoría empirista del conocimiento centrada en el sujeto; por ejemplo, Glaserfeld, uno de los constructivistas de la ciencia y las matemáticas más reconocidos actualmente, afirma que:

El conocimiento es el resultado de una actividad constructiva individual del sujeto; no se trata de un bien que de algún modo se encuentra fuera del sujeto cognoscente y que sea posible transmitir o infundir mediante percepción diligente o comunicación lingüística. (1990: 32)

Por otro lado, al referirse al conocimiento científico este investigador señala:

El hecho de que el conocimiento científico nos ayude a enfrentar el mundo no justifica la creencia de que el conocimiento científico nos da una imagen del mundo que corresponde a la realidad absoluta. (1989: 122)

Driver y Oldham (1986) por su parte comentan lo siguiente:

Aunque podamos suponer la existencia de un mundo externo, no tenemos acceso directo a él; la ciencia, en cuanto conocimiento público, es más una construcción verificada cuidadosamente, que un descubrimiento. (p.109)

y Confrey (1990) señala:

Dicho de manera sencilla, podemos describir el constructivismo como una teoría que, en esencia, marca los límites del conocimiento humano; la creencia de que todo conocimiento es necesariamente producto de nuestros propios actos cognitivos; no podemos tener un conocimiento directo o no mediado de ninguna realidad externa u objetiva. Construimos nuestra comprensión de las cosas a través de nuestras experiencias y el carácter de estas experiencias está profundamente influido por nuestros lentes cognitivos. (p.108)

Algunos autores como Brown (1979) y Garrison (1986) subrayan que la epistemología guía la teoría y práctica educativa constructivista, Matthews (1994) menciona algunas de las tesis obtenidas por ellos:

- 1) Las observaciones dependen siempre de un sistema teórico específico para expresarse. Hay una diferencia entre “ver” y “ver como”; esta última es una percepción proposicional que depende del lenguaje y las teorías.
- 2) La distinción entre los términos de la observación y los términos teóricos utilizados en una teoría particular sólo puede hacerse sobre bases pragmáticas, no epistémicas.
- 3) Las observaciones mismas están determinadas por la teoría o dependen de ella; lo que la gente busca y advierte está influido por lo que quiere ver o lo que considera pertinente para cierta investigación.
- 4) La evidencia empírica nunca determina las teorías, aun cuando se acumule mucha. Para cualquier conjunto de datos se puede construir cualquier número de teorías que tengan esos datos como implicación; para cualquier conjunto de puntos en una gráfica puede trazarse cualquier número de curvas que pasen por ellos.
- 5) La refutación empírica o falsación no afecta a las teorías ya que siempre pueden hacerse ajustes a las hipótesis auxiliares para acomodar la evidencia discrepante; no puede haber experimentos cruciales en la ciencia. Matthews (p. 424).

Con respecto a las tesis ontológicas del constructivismo, Glaserfeld señala:

El realista cree que sus construcciones son una réplica o un reflejo de estructuras que existen independientemente, mientras que el constructivista permanece atento al papel de aquel que tiene la experiencia como originador de todas las estructuras [ . . . ], para los

constructivistas no hay estructuras excepto aquellas que el sujeto cognoscente establece por su propia actividad de coordinación de las partículas de su experiencia. (1987: 104)

Mario Carretero (2002) argumenta lo siguiente:

Básicamente puede decirse que la idea que mantiene el individuo tanto en los aspectos cognitivos y sociales del comportamiento como en los afectivos no es un mero producto del ambiente ni un simple resultado de sus disposiciones internas, sino una construcción propia que se va produciendo día a día como resultado de la interacción entre dos factores. En consecuencia, según la posición constructivista, el conocimiento no es una copia fiel de la realidad, sino una construcción del ser humano. ¿Con qué instrumentos realiza la persona dicha construcción? Fundamentalmente con los esquemas que ya posee, con lo que ya construyó en su relación con el medio que le rodea. (p. 21)

Más adelante menciona que el proceso de construcción depende de dos aspectos fundamentales:

- De los conocimientos previos o representación que se tenga de la nueva información, o de la actividad o tarea a resolver.
- De la actividad externa o interna que el aprendiz realice al respecto. (pp. 67-69)

Díaz-Barriga (2002), indica las bases sobre las que se basa el constructivismo en relación al aprendizaje escolar:

La concepción constructivista del aprendizaje escolar se sustenta en la idea de que la finalidad de la educación que se imparte en las instituciones educativas es promover los procesos de crecimiento personal del alumno en el marco de la cultura del grupo al que pertenece. Estos aprendizajes no se producirán de manera satisfactoria a no ser que se suministre una ayuda específica mediante la participación del alumno en actividades intencionales, planificadas y sistemáticas, que logren propiciar en éste una actividad mental constructivista. Así la construcción del conocimiento escolar puede analizarse en dos vertientes:

- a) Los procesos psicológicos implicados en el aprendizaje.
- b) Los mecanismos de influencia educativa susceptibles de promover, guiar y orientar dicho aprendizaje.

Coll (1990) nos ofrece tres ideas fundamentales del constructivismo:

- a) El alumno es el responsable último de su propio proceso de aprendizaje. (Debe ser un sujeto activo cuando manipula, explora, descubre o inventa, incluso cuando lee o escucha la exposición de otros).
- b) La actividad mental constructiva del alumno se aplica a contenidos que poseen ya un grado considerable de elaboración. (Ya se encuentran elaborados y definidos la mayor parte de los contenidos curriculares).
- c) La función del docente es relacionar o conjuntar los procesos de construcción del alumno con el saber colectivo. (El profesor debe guiar las actividades para que el alumno desarrolle su mente de una manera constructiva). (pp. 441-442)

Por su parte Gil (2001) compara al aprendizaje de las ciencias con la investigación científica mencionando que se pueden manejar ambos como si fueran equivalentes. Él identifica dos condiciones para que tenga lugar el cambio conceptual:

- 1) Es preciso que se produzca insatisfacción con los conceptos existentes.
- 2) Ha de existir una concepción mínimamente inteligible que debe llegar a ser plausible, inicialmente contradiga las ideas previas del alumno y ha de ser potencialmente fructífera, dando explicación a las anomalías encontradas y abriendo nuevas áreas de investigación. (p.35)

Además propone un cambio tanto conceptual como metodológico donde las estrategias de enseñanza incluyan actividades que asocien el cambio conceptual con la práctica de aspectos clave de la metodología científica, destacando también la importancia de plantear al aprendizaje como tratamiento de situaciones problemáticas de interés. Partiendo de estos problemas propone que el aprendizaje de las ciencias sea visto como un programa de investigación:

Se trata, pues, de favorecer en el aula un trabajo colectivo de investigación dirigida, tan alejado del descubrimiento autónomo como de la transmisión de *conocimientos ya elaborados*. Ello exige la elaboración de "programas de actividades" (programas de investigación) capaces de estimular y orientar adecuadamente la (re) construcción de conocimientos por los alumnos (p.46).

## 1.4 Modelos conceptuales

Como hemos mencionado, el modelo constructivista de enseñanza de las ciencias concibe su aprendizaje como un proceso de construcción de conocimientos que parte fundamentalmente de los conocimientos previos.

Flores (2004), nos ofrece una categorización de los conceptos y de las teorías del cambio conceptual más recientes por medio de una nomenclatura que nos permite identificar tanto la genealogía, como la perspectiva desde donde se interpretan los conceptos. La tabla 2.4.1 muestra dicha categorización:

	Concepción del concepto.	Origen de la conceptualización.	Interpretación del cambio conceptual.
Teorías C - R	Entidad unitaria definida externamente.	Dada al sujeto (por el entorno o por otros sujetos).	Reemplazo de conceptos, proceso simple y abrupto.
Teorías E - R	Entidad unitaria cuyo significado depende de la teoría o sistema de interpretación al que pertenece.	Elaborado por los sujetos en función de estructuras y procesos cognitivos.	Reemplazo de conceptos, proceso complejo y progresivo.
Teorías C - CS	Entidad compleja constituida cuyo significado depende de un esquema cognitivo básico.	Determinado por las condiciones cognitivas innatas del sujeto, en su aspecto más básico o de manera externa.	Síntesis e integración de conceptos, proceso complejo y progresivo.
Teorías E -CS	Entidad dinámica que evoluciona en función del contexto y de nuevas relaciones.	Elaborado por los sujetos en función de estructuras y procesos cognitivos.	Proceso de construcción de nuevos conceptos y/o evolutivo de conceptos, proceso complejo y de largo plazo.

Tabla 2.4.1 Tomada de Flores (2004, p. 264) C=origen cognitivo; E=origen epistemológico; R=proponen reemplazo conceptual; CS=propone analizar el cambio conceptual como sistema complejo.

Es importante señalar lo que apuntan Pozo y Flores (2007) con respecto al término sistema complejo:

Representa una amplia variedad de posibilidades para el cambio conceptual, tales como la evolución de un sistema conceptual, la redescrición conceptual, la construcción de un sistema de conocimientos o bien, la posibilidad de construir múltiples representaciones. (p.242).

Dentro de la clasificación C-R, Flores (2004) ubica a la propuesta de Michelene Chi y colaboradores (1994) así como la de Nancy Nersessian (1984, 1992).

Para Chi, en las teorías científicas los conceptos están estructurados en redes jerárquicas de distinta naturaleza ontológica, y concibe el cambio conceptual como el cambio de significado de un concepto. Sin embargo, como el significado depende del sujeto, propone ubicarlo dentro de un sistema de categorías, ya que éstas son conjuntos que pueden definirse con precisión.

Ella parte de que todo conocimiento y todo concepto se puede clasificar en tres diferentes categorías ontológicas, a saber, "Materia", "Eventos" y "Abstracciones". En la primera se clasifican los objetos por sus propiedades físicas; en la segunda se encuentran los procesos y acciones ya sean naturales o provocadas por el hombre, es decir, entidades que pueden describirse en función del tiempo; y por último, en la categoría de las "Abstracciones", están los conceptos que no pueden ubicarse en el espacio-tiempo, es decir, no tienen referente fenomenológico.

Cada una de estas categorías se divide en subcategorías, de tal forma que la autora distingue dos tipos de cambio conceptual dependiendo de la ubicación de los conceptos. Si existe un cambio de ubicación entre las categorías, lo denomina cambio conceptual radical, y si el cambio ocurre entre subcategorías será no radical. El cambio radical es más complejo ya que se trata de la construcción de una nueva concepción de un concepto o proceso con características propias, y es de esta forma, como justifica la dificultad del

cambio conceptual pues en la mayoría de los casos se requiere de un cambio conceptual radical.

Por su parte Nersessian (1992) denomina a su método Análisis histórico-cognoscitivo y lo describe así:

El método combina el estudio de casos de las prácticas científicas con las herramientas y teorías de las ciencias cognitivas para crear una nueva teoría abarcadora de cómo las estructuras conceptuales son construidas y cambiadas. (p. 5).

Su propuesta consiste en analizar el proceso de justificación y creatividad considerando el aspecto histórico-cognoscitivo de un personaje científico. En primer lugar asume que la representación que implica el conocimiento consta de tres elementos: una representación proposicional, modelos mentales, y por último imágenes. A partir de estos factores divide al proceso de cambio conceptual en dos partes que denomina cinemática del cambio conceptual y dinámica del cambio conceptual. La cinemática del cambio conceptual describe los posibles cambios para un concepto dado, es decir, el cambio conceptual es visto como una sustitución de conceptos y, por lo tanto, esta en concordancia con la acepción kuhniana. La dinámica del cambio conceptual describe las causas de dicho cambio y esta constituida por los procesos cognitivos que conllevan la creatividad y el razonamiento. Dichos procesos Nersessian los describe como razonamiento analógico y razonamiento imaginativo; los experimentos pensados y el análisis de casos.

Por otro lado, dentro de la clasificación E-R Flores (2004) destaca la propuesta de Susan Carey (1991). Para la autora el cambio conceptual radica en el cambio de significación de términos entre lenguajes inconmensurables. Esta inconmensurabilidad es local ya que en su propuesta, Carey señala que no todos los cambios conceptuales tienen el mismo estatus, haciendo una diferenciación entre “conceptos que son subsumidos en nuevas categorías ontológicas y conceptos que son embebidos en teorías inconmensurables locales”. (p.259). Como ejemplo de este último proceso tenemos el concepto de materia, ya que puede ser vista como partícula o como onda; es decir, hubo un cambio de significado en el concepto donde “la inconmensurabilidad

involucra cambio al nivel de conceptos individuales en la transición de un lenguaje a otro". (p. 262). Carey explica que este cambio puede efectuarse bajo tres posibles procesos: *diferenciación* que consiste en distinguir conceptos que antes no lo estaban; *coalescencia* o integración de dos significados diferentes en uno solo y, el *cambio de una propiedad simple en una relación*.

Flores (2004) clasifica la propuesta de Vosniadou (1994) dentro de las teorías C-CS, la cual fue descrita más arriba y como mencionamos está en concordancia con la teoría de Piaget. Dentro de las teorías E-CS Flores (2004) destaca entre otras la propuesta de Andrea A. diSessa (1998). El autor parte de lo que llama *Primitivos fenomenológicos* o *p-prims*, es decir, entidades conceptuales básicas que el sujeto va construyendo a través de su experiencia cotidiana, que se encuentran fragmentados o no articulados pero que le permiten actuar de manera intuitiva. A medida que el sujeto evoluciona, estos primitivos se van asociando con otros elementos conceptuales para formar un sistema. En dicho sistema se van a reforzar o inhibir las asociaciones iniciales dependiendo de las inferencias del sujeto y del contexto en el que se encuentre; es decir, a medida que el sujeto se desarrolla el sistema de concepciones previas se va modificando, ya sea con la experiencia o el aprendizaje.

Como se ha podido observar, la remoción de las ideas previas es una tarea difícil de lograr que requiere de preparación y habilidad por parte del docente. Dentro de la literatura revisada se menciona que no existe un camino preestablecido para lograr el cambio conceptual en los alumnos; sin embargo, se ha encontrado un común denominador en los estudios hechos al respecto y es el de hacer consciente al alumno, a través de diversas estrategias, de los errores conceptuales que posee en lo referente a fenómenos y entendimiento científicos. Al respecto, Costamagna (2005) hace referencia a lo dicho por Pozo (1999) cuando señala:

Suelen darse ciertos saltos argumentales entre niveles distintos de análisis del cambio conceptual: el evolutivo (los cambios que tienen lugar como consecuencia del desarrollo cognitivo), el epistemológico (los cambios que han tenido lugar en la historia de la ciencia) y el Instruccional (los cambios que deben producirse como consecuencia de la enseñanza)...El hecho de hacer conscientes a los alumnos es el

primer paso que debería promover un buen docente para, que a partir de él, desencadenar un proceso de metacognición. La dimensión activa de la metacognición se manifiesta en el uso de estrategias, siendo la autoevaluación una de ellas. (p.421)

Por otro lado Carretero y Baillo (2002) encontraron que existe relación entre el proceso de cambio conceptual y dos factores: la comprobación de hipótesis y, aunque en menor grado, la aparición de contradicciones en las teorías que mantiene un sujeto. Con respecto al primero basaron su estudio en la falsación o verificación de las hipótesis del sujeto y con respecto al segundo, le mostraban a la persona contraejemplos de su teoría. De sus resultados concluyen:

[...] hemos visto que tanto la tarea de comprobar hipótesis como la de presentar contradicciones producen más o menos los mismos cambios en los sujetos de todas las edades. Por tanto parece importante que los contenidos científicos sean enseñados de manera conjunta con sus métodos. Una vez más conviene decir que conceptos y procedimientos resultan bastante indisolubles (...) es muy probable que la eficacia de la enseñanza expositiva sea mayor cuando se lleve a cabo después de haber hecho que los alumnos se cuestionen sus ideas previas mediante comprobación de hipótesis y contradicciones. (p.103)

Pienso que parte de esta concientización debe incluir la explicación de qué debemos entender por desarrollo científico y cómo se va generando éste, ya que así brindamos al alumno un contexto más claro y se facilita promover un cambio representacional.

En la presente investigación se define entendimiento científico como el tipo de entendimiento que surge de las explicaciones de los conceptos científicos y sus desarrollos, los cuáles no deben verse como mutuamente excluyentes, sino por el contrario, la diversidad de alternativas puede servir para articular el entendimiento. Martínez (2007) señala respecto a las explicaciones científicas lo siguiente:

Las explicaciones generan entendimiento muchas veces con cierta independencia de otras explicaciones, pero es la integración de explicaciones la que usualmente genera el tipo de entendimiento que asociamos con el avance de la ciencia...El avance de la ciencia, en buena medida, se encuentra plasmado en representaciones novedosas de lo contingente, que pueden ser utilizadas para la promoción de nuestros valores, el conocimiento de la estructura causal del mundo entre ellos. Martínez pp. 27-28).

Con base en lo anterior, creemos que la integración de explicaciones científicas a través de su desarrollo histórico, en conjunto con la diversidad de recursos didácticos existentes generan un mejor entendimiento de un fenómeno o proceso, y ayudan a caracterizar el avance de las ciencias.

Dentro de las soluciones propuestas para lograr promover el cambio conceptual, está la de estudiar el papel que juegan la historia y la filosofía de la ciencia en la educación científica, sobre todo, con la idea de promover la instrucción científica y la de lograr un entendimiento cualitativo de los conceptos científicos. Si bien esta propuesta se ha estudiado más profundamente durante la década de los noventa (Matthews, Masson, Wandersee, Roach), se encuentra en la literatura especializada lo que podría llamarse sus orígenes a partir de las críticas hechas por algunos científicos e intelectuales entre los años cuarenta y sesenta (Bush, Nagel, Niebuhr, Whitehead, Riesman), a los sistemas educativos de los países más desarrollados en los que se empezaba a privilegiar la ciencia sobre las humanidades por motivos, sobre todo, políticos y económicos. Como ejemplo de lo anterior Reinhold Niebuhr citado por Douglas Bush (1960, p. 169), dice:

Una cultura técnica o tecnocrática genera presiones utilitarias poderosas y desarrolla medios de comunicación masiva – radio, televisión, cine revistas- las cuáles tienden a reducir la cultura a una especie de sofisticada vulgaridad en donde la vulgaridad del hombre iletrado de otras épocas parecería como inocencia pura.

Bush (1960, p.172) señala “(...) sin las humanidades y lo que representan, la ciencia puede volverse un mero instrumento de las agresivas pasiones del hombre...”

Por su parte Nagel (1960) destaca tres puntos que considera indispensables en la docencia de las ciencias, a saber:

- 1) Deben mostrarse los valores liberales de la ciencia, es decir, los materiales de una disciplina deben presentarse de tal manera que reflejen los principios lógicos que controlan el análisis, la organización, validación y modificación de los enunciados científicos, y mostrar que estos últimos son el resultado de una inteligencia crítica pero creativa.
- 2) Debe concientizarse a los alumnos de que los conceptos científicos no se obtuvieron por una simple abstracción de datos empíricos, sino que son creaciones intelectuales generalmente sugeridas por los datos y son producto de una imaginación constructiva.

- 3) El estudiante debe saber que la evidencia que soporta una hipótesis puede tener diferentes grados de fuerza probativa, dependiendo de la composición y del modo en que se obtuvo dicha evidencia así como del carácter de las conclusiones que permitieron usarla como soporte. (pp.188-207).

Matthews (2001) resalta que actualmente lo que se busca en los llamados desarrollos curriculares liberales específicamente en el Reino Unido, Estados Unidos, Canadá, Australia y Japón, es buscar que el alumno no sólo obtenga un conocimiento de la ciencia, sino también, sobre la ciencia y cita (p.359) la propuesta de la American Association for the Advancement of Science (AAAS, 1990,p.24), en *The Liberal Art of Science* :

Science courses should place science in its historical perspective. Liberally educated students—the science major and the nonmajor alike—should complete their science courses with an appreciation of science as part of an intellectual, social, and cultural tradition . . . . Science courses must convey these aspects of science by stressing its ethical, social, economic, and political dimensions.

Morin (2001) hace una propuesta sobre lo que él considera que la educación del nuevo milenio debe contemplar; entre los puntos que toca está evitar la fragmentación excesiva del conocimiento ya que lleva a una hiperespecialización del mismo, lo que impide verlo en forma multidimensional y señala:

La especialización extrae un objeto de su contexto y de su conjunto, rechaza los lazos y las intercomunicaciones con su medio, lo inserta en un sector conceptual abstracto que es el de la disciplina compartimentada cuyas fronteras resquebrajan de manera arbitraria la sistemicidad (relación de una parte con el todo) y la multidimensionalidad de los fenómenos; conduce a una abstracción matemática que opera en sí misma una escisión con lo concreto, privilegiando todo cuanto es calculable y formalizable. (p. 40)

En su libro *El conocimiento del conocimiento* (2006), Morin hace hincapié en la separación existente específicamente entre ciencia y filosofía al apuntar lo siguiente:

Se puede y se debe definir filosofía y ciencia en función de dos polos opuestos del pensamiento: la reflexión y la especulación para la filosofía, la observación y la experiencia para la ciencia. Pero sería vano creer que en la actividad científica no hay reflexión ni especulación, o que la filosofía desdeña por principio la observación y la experimentación. Los caracteres dominantes en una quedan

dominados en la otra y viceversa . Y ésta es la razón de que no haya frontera <<natural>> entre una y la otra. (p.29)

De acuerdo con lo anterior, la enseñanza de las ciencias va más allá de desarrollar habilidades o destrezas profesionales, es decir, las ideas científicas y el desarrollo científico tienen una carga filosófica, histórica, social, cultural y económica de las que el estudiante debe estar consciente desde los primeros cursos de asignaturas de corte científico.

Por otra parte, en lo que se refiere al presente trabajo, el referente teórico es el constructivismo y al incluir la perspectiva histórica del desarrollo del conceptos de coeficiente de difusión, y concebir al cambio conceptual como un cambio de significado de un concepto, se acerca más a las propuestas de Chi (1994) y Nersessian (1992).

## CAPÍTULO 2

### CONTEXTUALIZACIÓN Y METODOLOGÍA

#### 2.1 Contexto

La licenciatura en Ingeniería Química Metalúrgica se imparte en la Facultad de Química de la UNAM, donde además de ésta, se imparten las licenciaturas en: Ingeniería Química, Química, Química Farmacéutico-Biológica, y Química de Alimentos. El programa o plan de estudios vigente de esta carrera tiene como misión:

Formar integralmente a profesionales de la Licenciatura de Ingeniería Química Metalúrgica con una alta preparación académica, cuyo desempeño considere como prioridad el bien de la sociedad mexicana y el desarrollo sustentable del país, respetando en todo momento la libertad y la pluralidad de los individuos, contribuyendo al prestigio y la defensa de la Facultad y de la UNAM. (<http://www.quimica.unam.mx>)

A partir del año 2009, se pretende que la visión del programa sea la siguiente:

La Licenciatura sea reconocida a nivel nacional y esté acreditada por la alta calidad científica y humana de sus egresados y la organización e infraestructura de la Facultad de Química de la UNAM.

La implantación del plan de estudios modificado en 2005 sea un éxito, al utilizar metodologías de enseñanza-aprendizaje diversificadas, y recursos humanos y materiales de alta calidad.

Un elevado número de estudiantes y profesores que participan en programas de movilidad nacional e internacional tengan un impacto considerable en las actividades académicas de la Licenciatura.

Los egresados formados en este programa, sean reconocidos como líderes en su disciplina en el país y en el extranjero.

La vida académica del programa se ha fortalecido notablemente, mediante la creación de claustros de profesores y la programación de actividades académicas frecuentes. (<http://www.quimica.unam.mx>)

El plan de estudios actual de la Licenciatura en Ingeniería Química Metalúrgica contempla una subárea de Ingeniería (consistente en cinco asignaturas obligatorias y tres optativas) en la que se forma a los estudiantes en los fundamentos y la aplicación de la modelación matemática y física de procesos de obtención de materiales metálicos y de manufactura de componentes ingenieriles, con el objetivo de capacitarlos para su desempeño profesional en el campo de la Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y de Materiales. El grupo de asignaturas obligatorias se subdivide en: 1) un primer subgrupo en el que se estudian los fundamentos de los fenómenos de transporte; 2) una asignatura centrada en las técnicas de solución numérica (y su implementación en computadora) de problemas matemáticos asociados con el análisis de los fenómenos de transporte; y 3) una asignatura terminal en la que, mediante el desarrollo en detalle de un modelo matemático de un proceso real por parte de cada estudiante, se conjuntan y aplican no sólo los conocimientos de la subárea de Ingeniería sino que también se integran conocimientos de las otras subáreas de la carrera. Con este ejercicio de cierre para la subárea se espera que el estudiante sea capaz de comprender el proceso que estudió y proponer medidas para optimizarlo. Además, se ofrecen tres asignaturas optativas relacionadas con la Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y de Materiales. El plan de estudios completo puede consultarse en la página Web de la Facultad de Química de la UNAM (<http://www.quimica.unam.mx>) en el apartado *Enseñanza/Licenciaturas/Ingeniería Química Metalúrgica*.

En particular, la asignatura “Transporte de Masa” (clave 1639) es una asignatura obligatoria de la subárea de Ingeniería, que se imparte en el sexto de nueve semestres del plan de estudios. La asignatura tiene asignadas tres horas de teoría y tres horas de problemas, dando un total de 9 créditos.

## 2.2 Metodología

Se trabajó con una metodología pretest-postest que se caracteriza por la aplicación previa de un cuestionario o test a un grupo seleccionado de sujetos, seguido de un tratamiento y finalmente la aplicación posterior del mismo cuestionario.

Con la finalidad de identificar: 1) la noción que tienen los estudiantes del concepto de *coeficiente de difusión*, 2) la importancia que le dan al conocimiento de la historia de la ciencia y 3) el grado de concientización que tienen con respecto al desarrollo histórico del concepto de *coeficiente de difusión*, se diseñó un cuestionario para aplicarse a un grupo de alumnos de la asignatura Transporte de Masa durante el semestre 2012-1, centrado en uno de los conceptos clave de la asignatura (anexo1). Se seleccionó esta asignatura porque en ella se estudia y aplica el concepto de coeficiente de difusión, con mayor profundidad que en otras previamente cursadas por los alumnos. Adicionalmente, hay preguntas relacionadas con otros dos conceptos fundamentales en los cursos de la línea de Fenómenos de Transporte: el factor de fricción y el concepto de calor. El cuestionario se aplicó dos veces, la primera, antes de abordar en clase el estudio del concepto de interés, y donde verbalmente se les hizo la aclaración de que este cuestionario sólo tiene fines informativos y no se tomaría en cuenta para su calificación, por lo que también se les pidió que lo contestaran en forma individual y lo más honestamente posible.

La segunda aplicación del cuestionario se realizó después de haber estudiado en clase dicho concepto. En el anexo 4 se describe el programa de estudio para esta asignatura, así como algunas sugerencias didácticas para impartirla. Además, se les proporcionó a los alumnos el artículo *One and a half century of diffusion: Fick, Einstein, Before and Beyond* de J. Philibert (anexo 2) para su lectura, y se les pidió que realizaran una tarea relacionada con ese artículo (anexo 3).

### 2.3 Instrumentos

El cuestionario aplicado fue piloteado y afinado para tratar de evitar posibles confusiones en las preguntas, está dividido en dos partes: en la primera, se obtienen los datos personales de los alumnos, en particular: si son alumnos regulares o irregulares y la preparatoria o escuela de procedencia. Lo anterior tiene como finalidad conocer mejor a la población y poder, en el futuro, buscar correlaciones entre el comportamiento de los estudiantes y su procedencia. En la parte medular del cuestionario se plantean diez preguntas cuyos objetivos son los siguientes:

Pregunta 1: Conocer la importancia concedida por el alumno a la historia de la ciencia.

Pregunta 2: Conocer si pueden definir adecuadamente el concepto a estudiar, dado que no es totalmente desconocido por ellos. Esta pregunta se subdivide en tres incisos: a) factor de fricción, 2) calor y 3) coeficiente de difusión, donde los dos primeros corresponden a asignaturas previas a “Transporte de Masa” dentro de la línea de Ingeniería de Procesos.

Pregunta 3: Conocer si el alumno tuvo conocimiento de alguno de los conceptos de la pregunta 2 en alguna otra asignatura.

Preguntas 4, 5 y 6: Saber qué tan clara tiene el alumno la aplicación de los conceptos de: calor (pregunta 4), factor de fricción (pregunta 5) y coeficiente de difusión (pregunta 6); es decir, probablemente los puede definir correctamente pero no sabe dónde o cómo aplicarlos dentro del campo de Ingeniería Química Metalúrgica.

Pregunta 7: Conocer si el alumno está familiarizado con la historia del desarrollo científico a través de alguna asignatura cursada durante la licenciatura de IQM.

Preguntas 8 y 9: Conocer si el alumno está consciente de factores que pueden modificar a la evolución del conocimiento científico y el desarrollo tecnológico.

Pregunta 10: Conocer si el alumno sabe de controversias históricas relacionadas con alguno de los conceptos de factor de fricción, calor y/o coeficiente de difusión.

## 2.4 Población estudiada

El tamaño de la población fue de 49 estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería Química Metalúrgica constituida por 19 mujeres y 30 hombres, con una edad promedio de 22.5 años. Los estudiantes se encuentran cursando entre el quinto y noveno semestre, es decir, el 20% son alumnos regulares y el 80% son irregulares, lo que no significa un caso excepcional, pues esta situación se presenta frecuentemente dentro de la Facultad de Química de la UNAM. Cabe mencionar que el promedio de alumnos que se inscriben anualmente en esta licenciatura oscila entre 90 y 100 alumnos.

En la tabla 2.1 se indican los resultados obtenidos de la caracterización de la población, correspondiente a la primera parte del cuestionario.

TABLA 2.1 Caracterización de la población.

Edad promedio (años)	22.5
Población femenina (%)	40
Población masculina (%)	60
Cursaron CCH (%)	23
Cursaron preparatoria (%)	65
Cursaron otro sistema (%)	12
Alumnos regulares (%)	20
Alumnos irregulares (%)	80

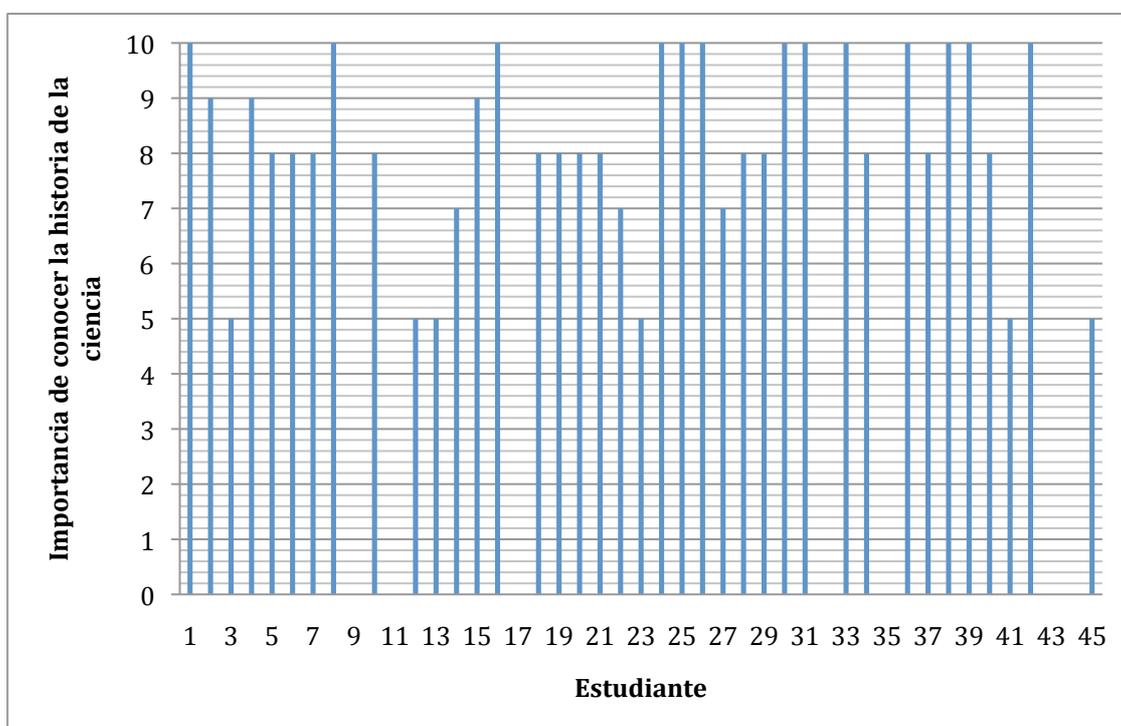
## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

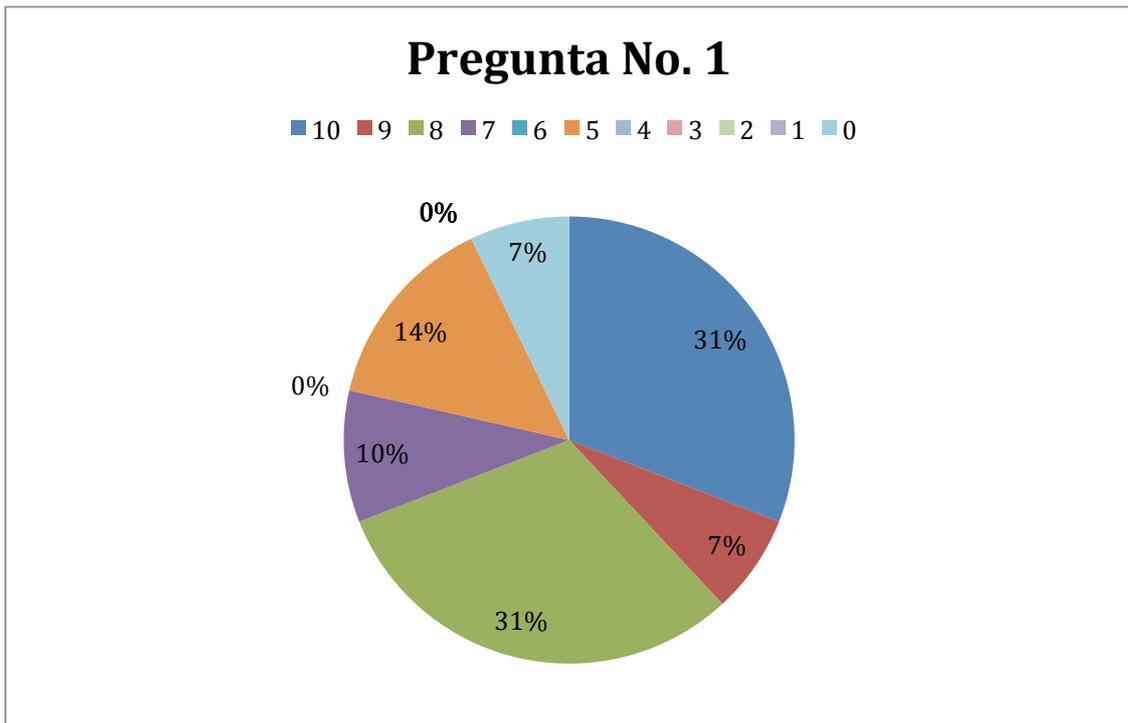
Los resultados siguientes fueron los obtenidos de la primera aplicación del cuestionario o aplicación previa, es decir, antes de estudiar en clase el desarrollo del concepto de coeficiente de difusión. De la parte medular del cuestionario se obtuvieron los resultados siguientes (agrupados por pregunta):

Pregunta No. 1

La gráfica 3.1 muestra las respuestas obtenidas de la pregunta No.1 con respecto a la importancia que tiene conocer la historia de la ciencia en una escala de 0 (ninguna importancia) a 10 (mucho importancia). El promedio de importancia es de 7.61 puntos. La gráfica 3.2 muestra la distribución de éstas respuestas y muestra que un 7 por ciento de los estudiantes no le otorga importancia alguna a este rubro para su formación. El 69 por ciento le otorga una importancia entre 8 y 10 puntos, lo que nos indica que la mayoría sabe o intuye la importancia de esta herramienta.



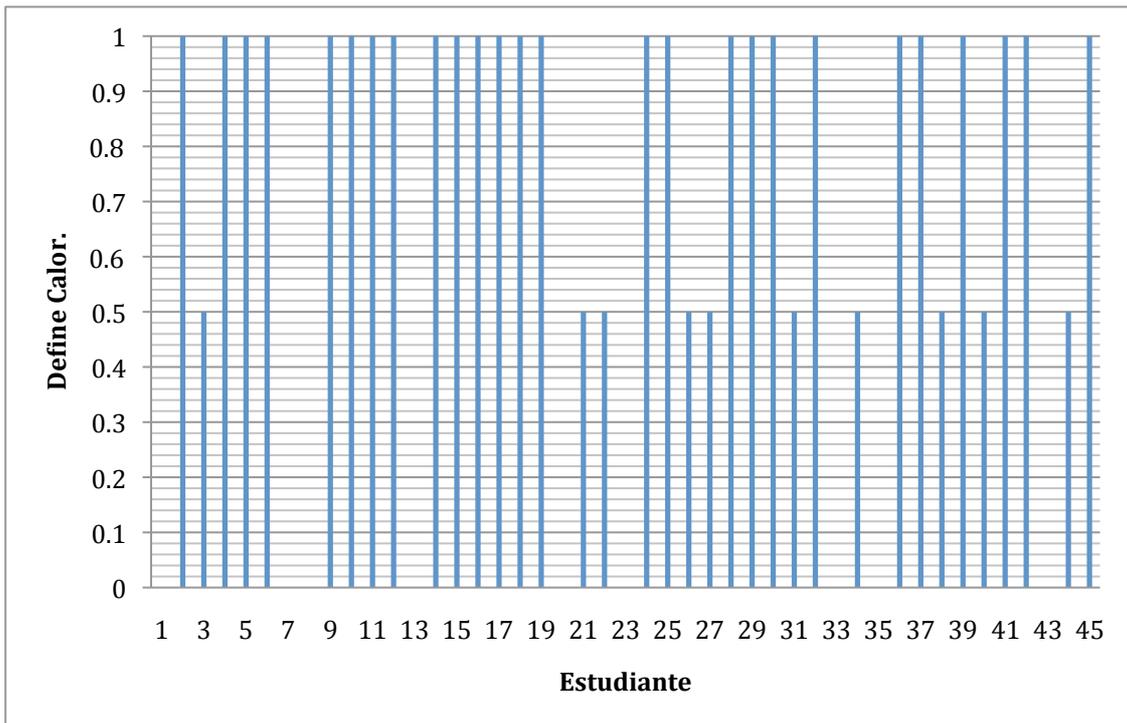
Gráfica 3.1 Respuestas a la pregunta No.1 del cuestionario previo.



Gráfica 3.2 Distribución de respuestas para la pregunta No.1 del cuestionario previo.

#### Pregunta No. 2(a)

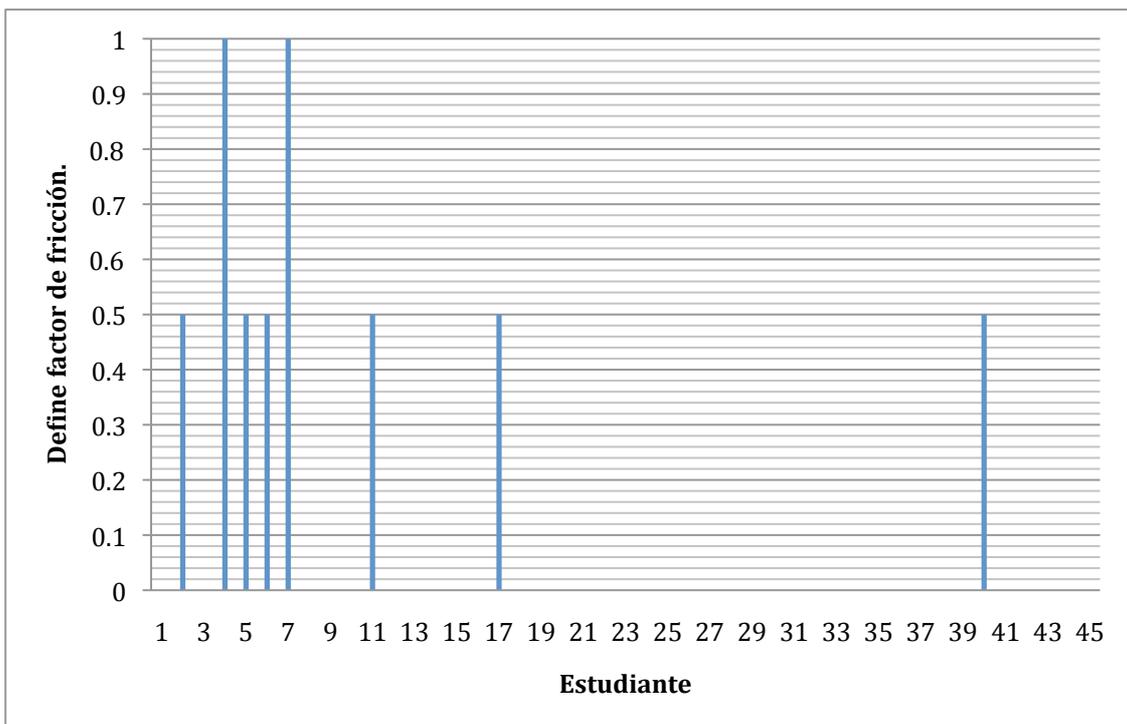
La escala asignada para las preguntas 2(a), 2(b) y 2(c) relacionadas con la definición de los conceptos de calor, factor de fricción y coeficiente de difusión respectivamente, fue la siguiente: 0 si la respuesta es incorrecta, 0.5 si está incompleta o le falta claridad, mientras que 1 si se trata de una respuesta correcta. Bajo esta escala para la pregunta 2(a), gráfica 3.3, se obtuvo un promedio de 0.689 lo que nos indica que los estudiantes tienden a definir correctamente el concepto de calor, pero falta claridad en sus respuestas.



Gráfica 3.3 Respuestas a la pregunta No.2(a) del cuestionario previo.

Pregunta No. 2(b)

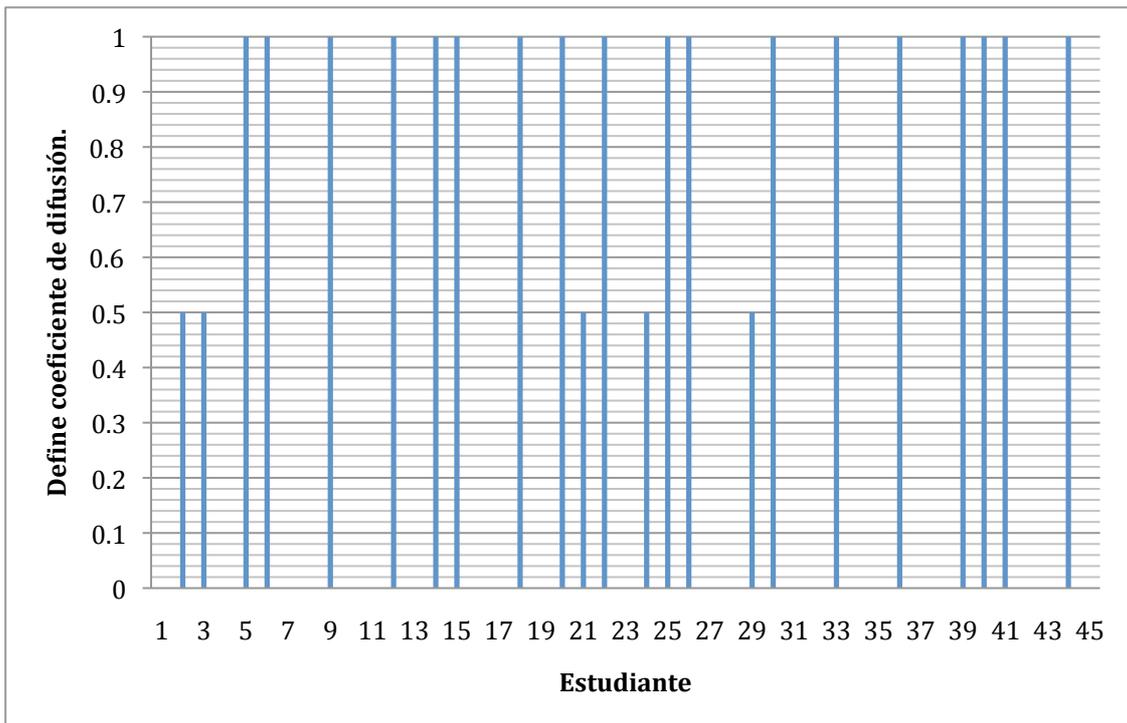
La gráfica 3.4 refleja un nivel de conocimiento muy bajo del factor de fricción ya que la mayoría de los estudiantes no pudo definirlo correctamente. El promedio obtenido es de 0.11 puntos de



Gráfica 3.4 Respuestas a la pregunta No.2(b) del cuestionario previo.

### Pregunta No. 2(c)

De la gráfica 3.5 el promedio obtenido fue de 0.4556 puntos de 1, lo que nos indica que también existe una alta dificultad para definir el coeficiente de difusión, aunque menor que con respecto al caso anterior. Como podemos observar el concepto de calor es el que menos dificultad presenta a los alumnos para ser definido, lo que consideramos es un resultado muy interesante ya que tanto el factor de fricción como el calor, son conceptos que han venido trabajando desde la escuela secundaria en sus cursos de Física.

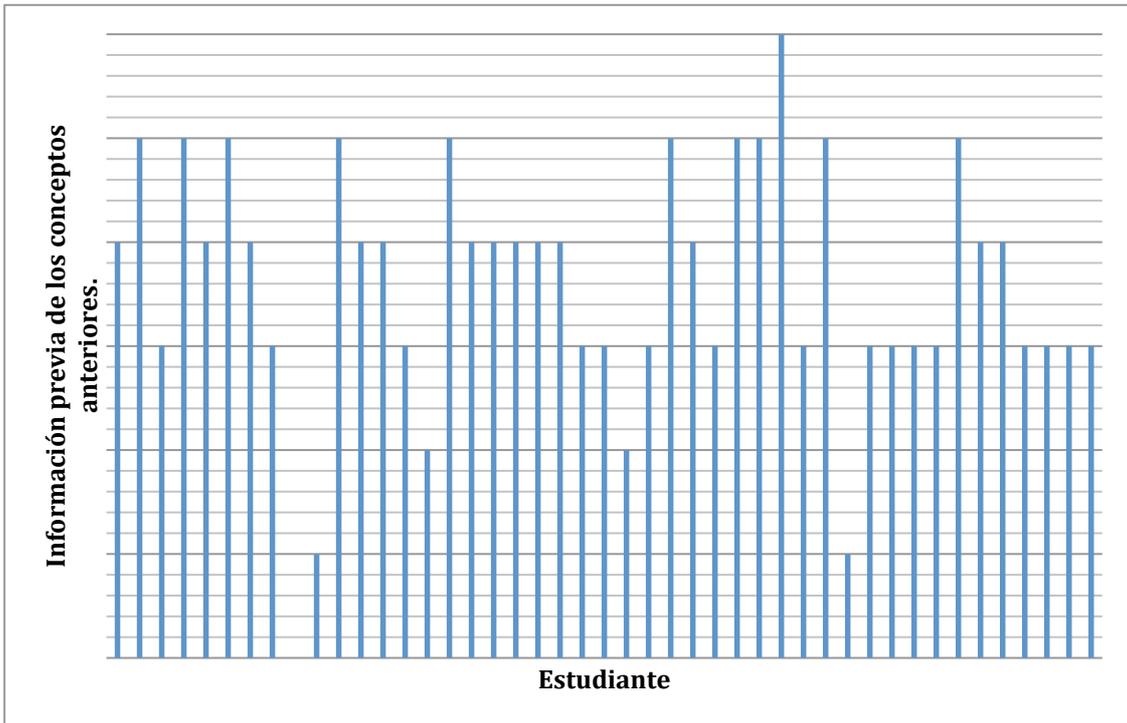


Gráfica 3.5 Respuestas a la pregunta No. 2(c) del cuestionario previo.

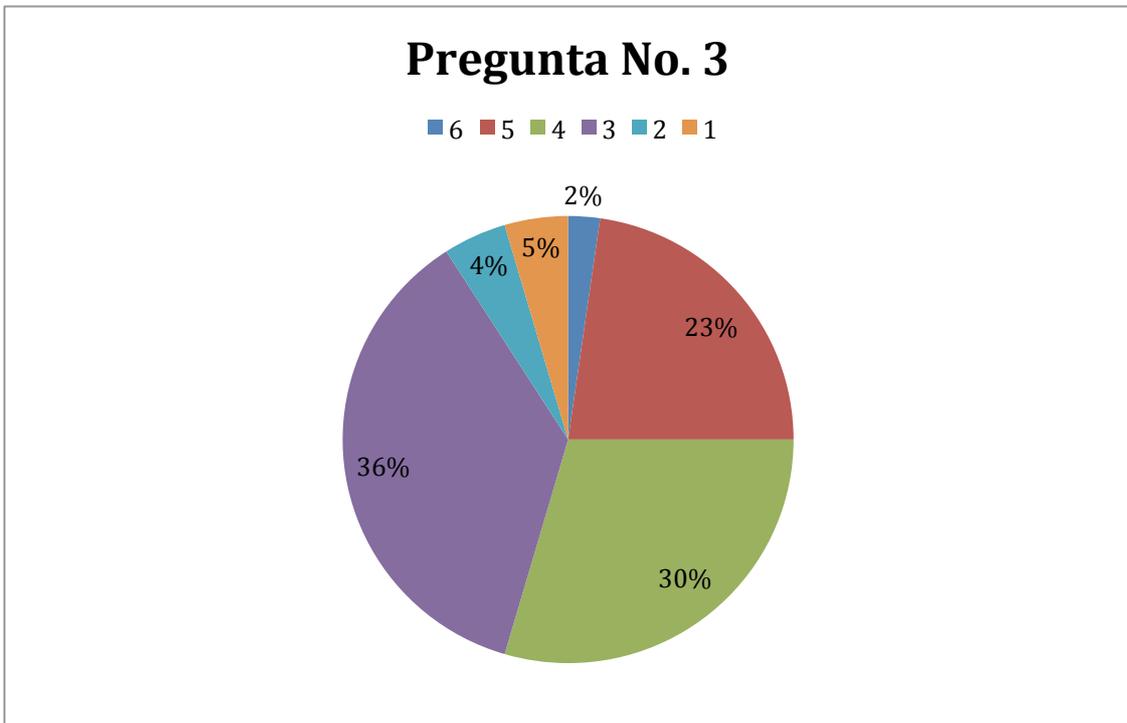
### Pregunta No. 3

La gráfica 3.6 muestra el número de asignaturas en la que los estudiantes afirman haber obtenido información sobre los conceptos en cuestión, estableciéndose una escala de 0 a 6 donde 0 es que en ninguna asignatura han recibido información sobre los conceptos, y 6 es el número máximo de asignaturas por ellos mencionados. El promedio de materias es de 3.682.

De la gráfica 3.7 podemos observar que el 89 por ciento de los alumnos afirma haber obtenido información previa de los conceptos en al menos tres asignaturas durante su formación profesional.



Gráfica 3.6 Respuestas a la pregunta No.3 del cuestionario previo.

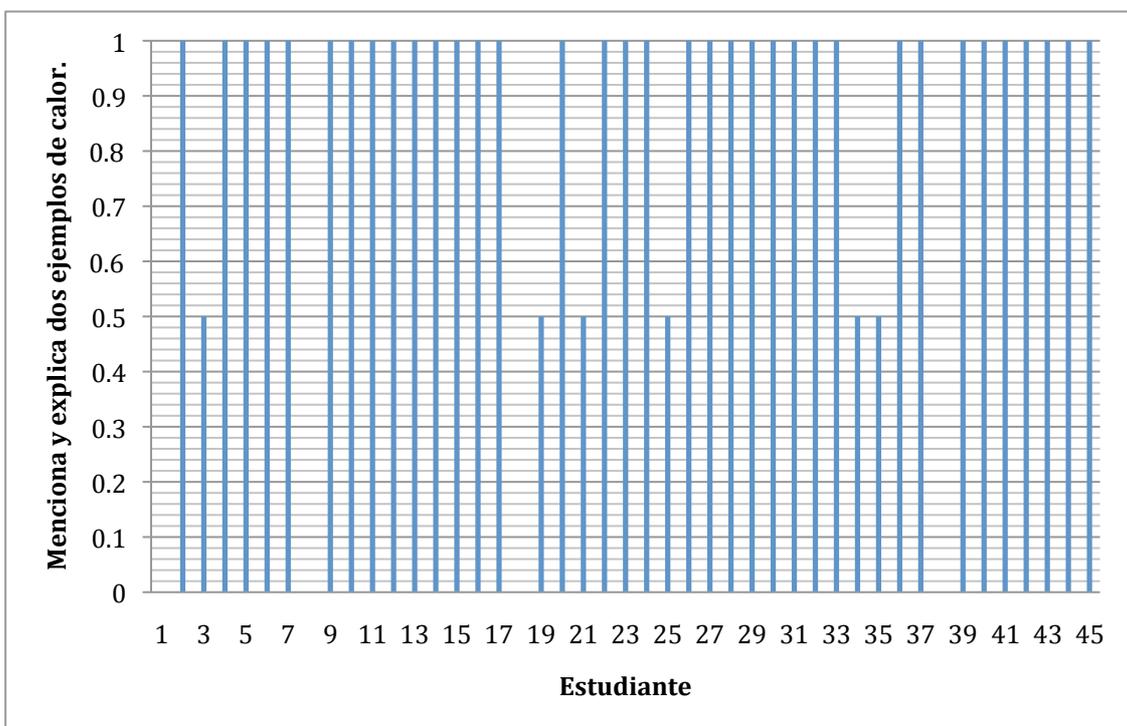


Gráfica 3.7 Distribución de respuestas para la pregunta No.3 del cuestionario previo.

#### Pregunta No. 4

La escala utilizada en la gráfica 3.8 corresponde a la utilizada en las preguntas 2(a), 2(b), 2(c) y será la misma para las preguntas 5,6,8 y 9 del cuestionario.

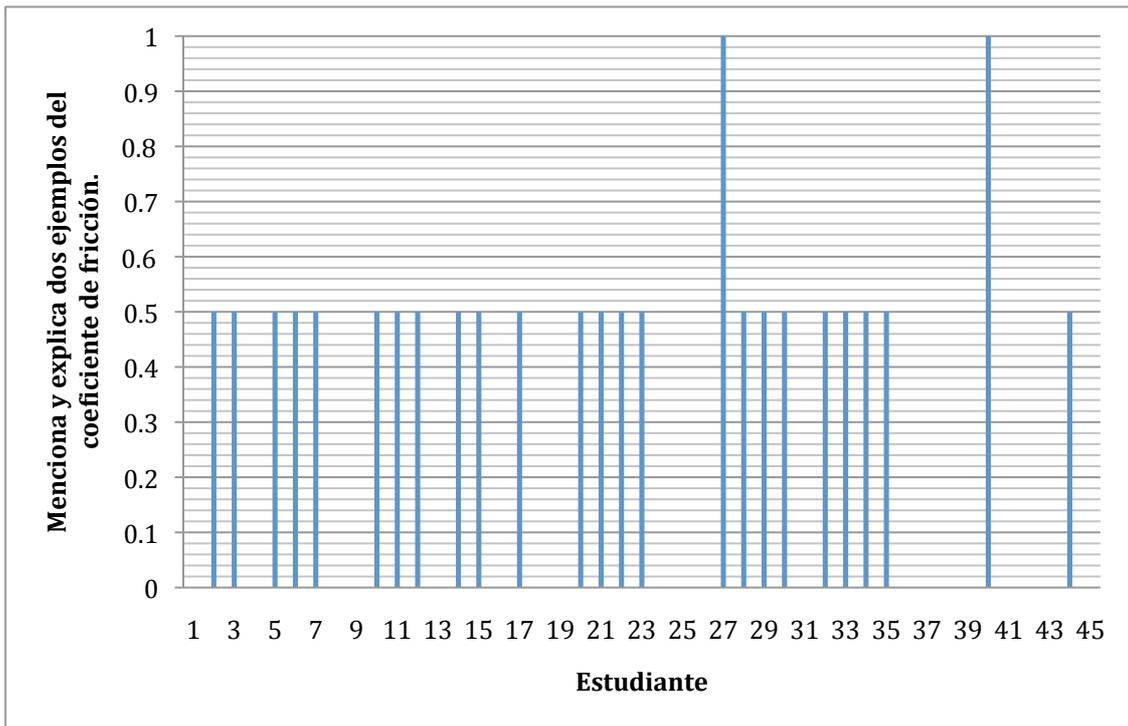
Observamos en dicha figura que una gran parte de los alumnos respondió satisfactoriamente a la pregunta referente a dos ejemplos de aplicación de calor, lo que muestra coherencia con las respuestas obtenidas en la pregunta 2(a). El promedio de ésta gráfica es de 0.844 puntos de 1.



Gráfica 3.8 Respuestas a la pregunta No.4 del cuestionario previo.

#### Pregunta No. 5

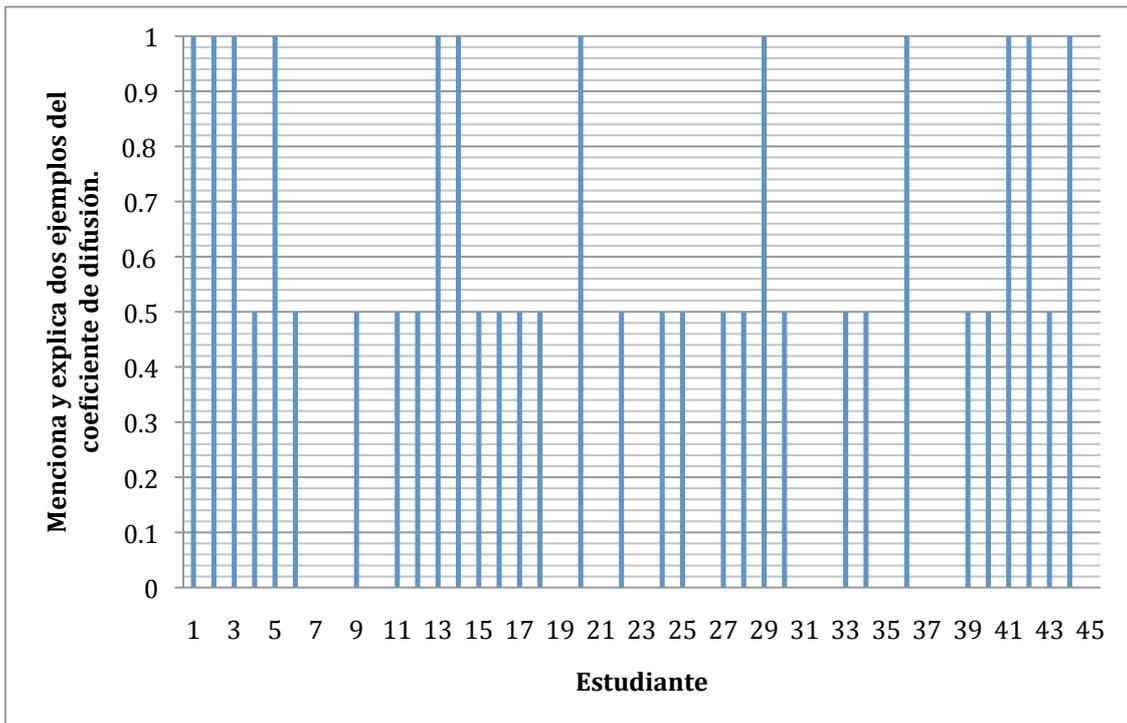
La gráfica 3.9 también muestra resultados coherentes con los obtenidos en la pregunta 2(b), ya que al no poder definir correctamente el factor de fricción, es de esperarse que también les sea difícil mencionar ejemplos del mismo. El promedio obtenido en este caso es de 0.3 puntos de 1.



Gráfica 3. 9 Respuestas a la pregunta No.5 del cuestionario previo.

#### Pregunta No. 6

Como se observa en la gráfica 3.10, el promedio para la pregunta sobre el coeficiente de difusión fue algo superior con respecto al de la pregunta anterior, 0.489 puntos de 1, manteniendo también congruencia con las respuestas obtenidas en la pregunta 2(c).

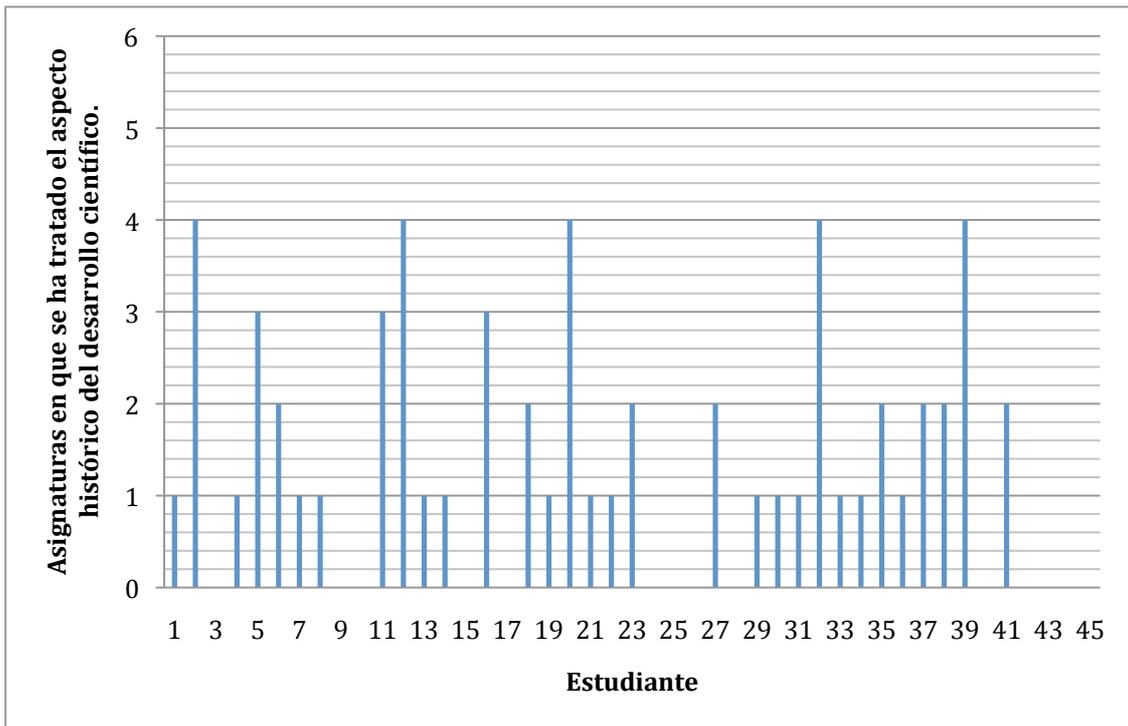


Gráfica 3. 10 Respuestas a la pregunta No.6 del cuestionario previo.

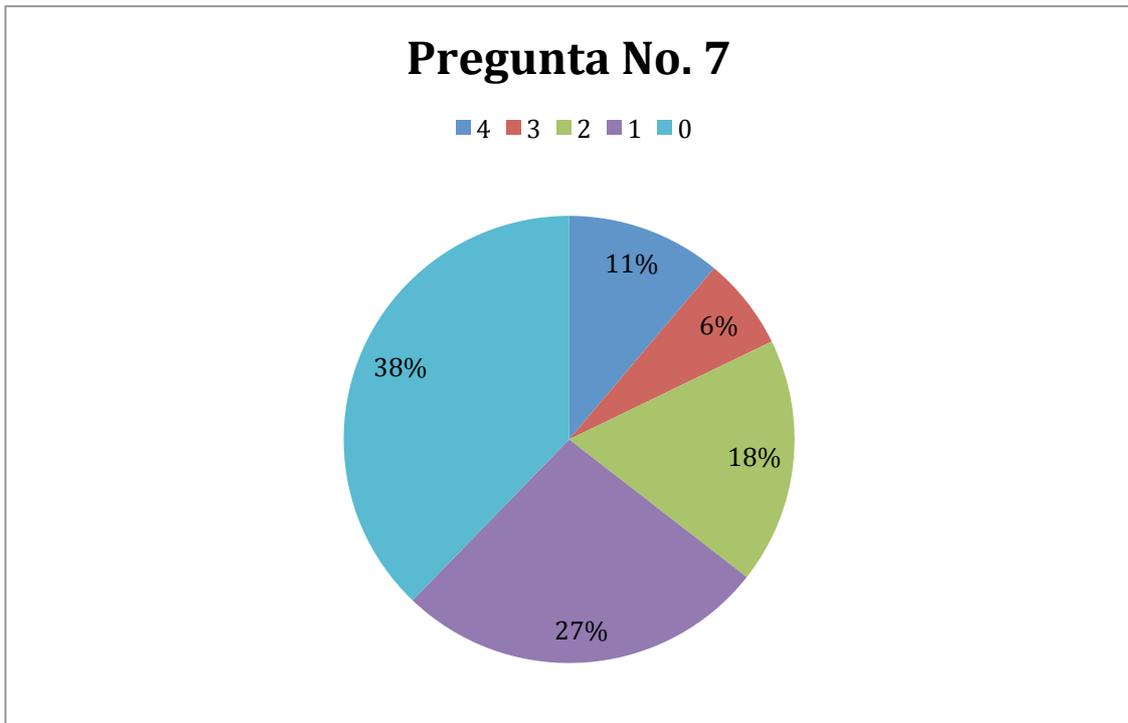
Pregunta No. 7

La gráfica 3.11 nos muestra el número de asignaturas en la que los estudiantes expresan haber tratado el aspecto histórico del desarrollo científico o tecnológico, la escala va de 0 a 4 asignaturas correspondiente al máximo número por ellos mencionado. El promedio obtenido para esta pregunta es de 1.33 asignaturas.

En la gráfica 3.12 se observa, de la distribución de respuestas, que el 38 por ciento de los alumnos afirma no haber tratado el aspecto histórico en alguna asignatura, 45 por ciento dice haberlo tratado en al menos dos y el resto en más de tres asignaturas.



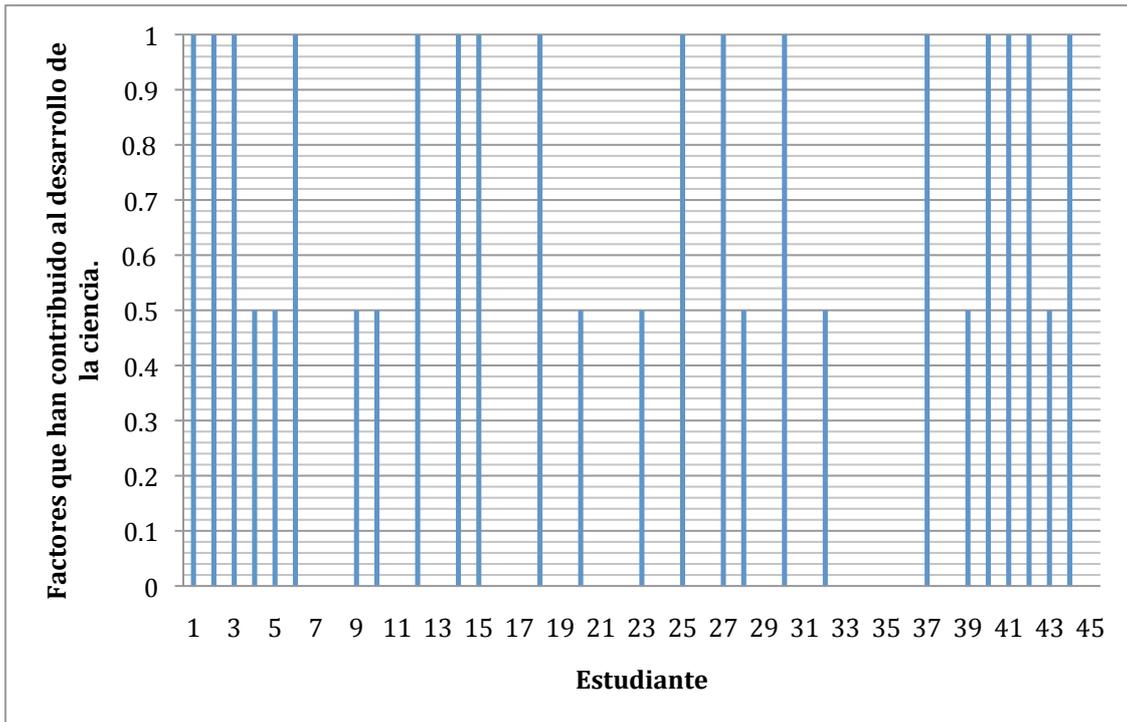
Gráfica 3.11 Respuestas a la pregunta No.7 del cuestionario previo.



Gráfica 3.12 Distribución de respuestas para la pregunta No.7 del cuestionario previo.

### Pregunta No. 8

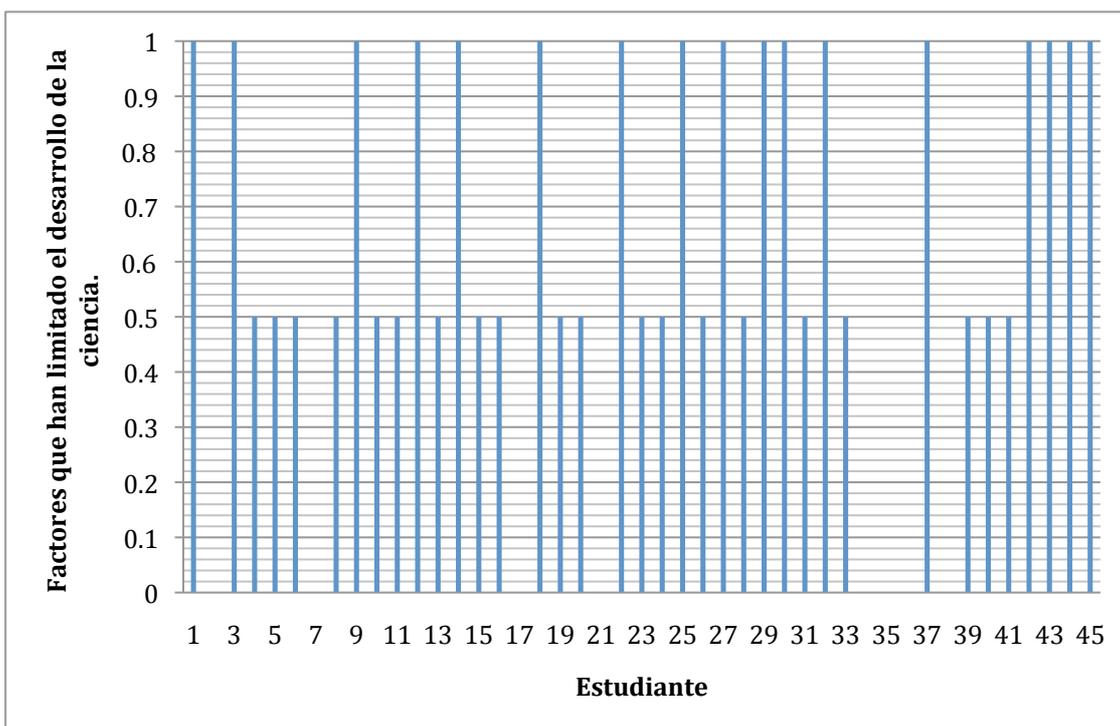
Esta pregunta se refiere a los factores que el alumno considere hayan contribuido al desarrollo de la ciencia y la tecnología. La escala va de 0 (incorrecto), 0.5 (regular) y 1 (correcto). La gráfica 3.13 muestra las respuestas obtenidas siendo el promedio de 0.467 puntos de 1, lo que nos dice que menos de la mitad de los encuestados respondió entre regular y bien.



Gráfica 3.13 Respuestas a la pregunta No.8 del cuestionario previo.

### Pregunta No. 9

Con respecto a los factores que los estudiantes consideran que han limitado el desarrollo de la ciencia y la tecnología, el promedio aumentó respecto al anterior obteniéndose un valor de 0.6 puntos de 1, utilizando la misma escala que para la pregunta No.8. Este resultado a partir de la gráfica 3.14, nos indica que fue más fácil para los alumnos señalar obstáculos que coadyuvantes.

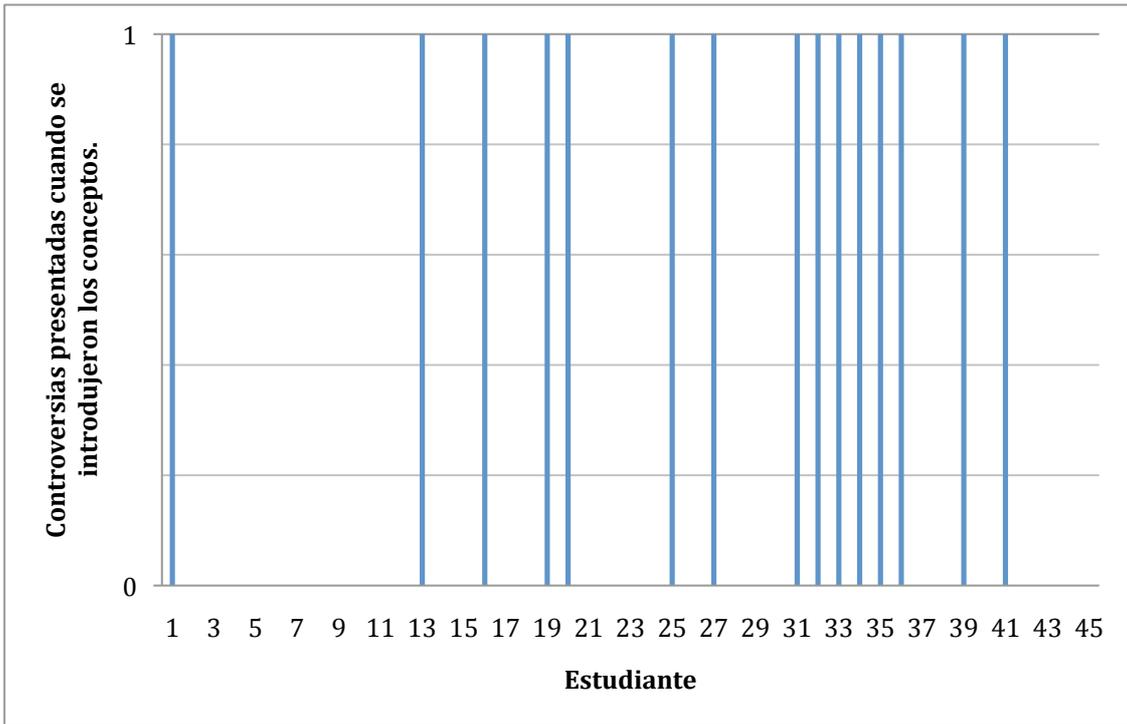


Gráfica 3.14 Respuestas a la pregunta No.9 del cuestionario previo.

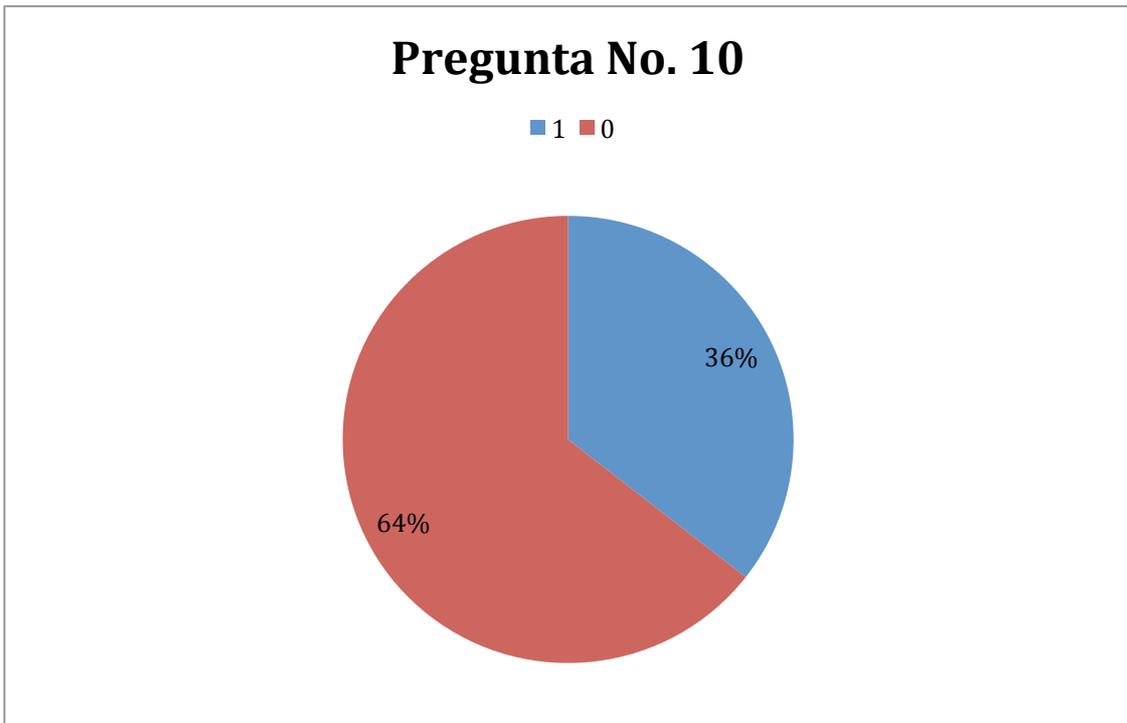
#### Pregunta No. 10

La pregunta 10 nos informa si los estudiantes conocen algunas controversias surgidas cuando se presentaron por vez primera los conceptos en cuestión. En la gráfica 3.15, el valor de 1 corresponde a una respuesta afirmativa, mientras que el valor de 0 corresponde a una respuesta negativa. Como es posible observar, la mayoría de los estudiantes respondió negativamente. El promedio para esta pregunta es de 0.33 puntos.

La gráfica 3.16 señala la distribución de los porcentajes de estas respuestas, el 64 por ciento dice desconocer algún factor controversial, mientras que el 36 por ciento dice conocerlo y además logró exponerlo.



Gráfica 3.15 Respuestas a la pregunta No.10 del cuestionario previo.



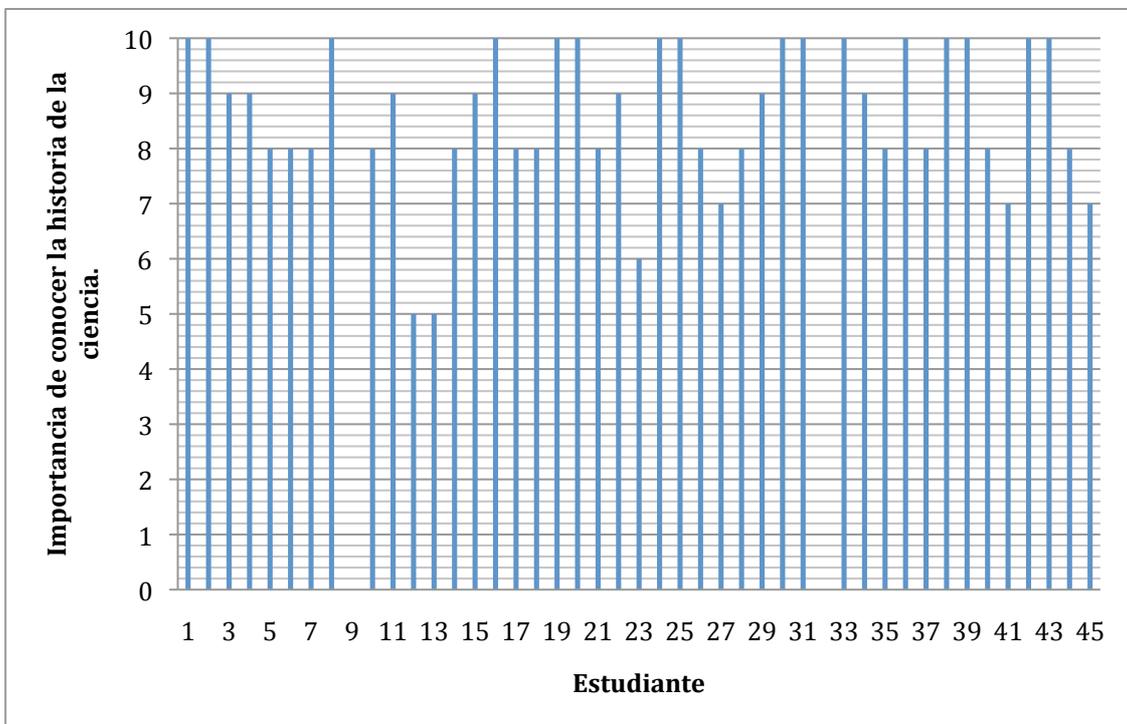
Gráfica 3.16 Distribución de respuestas para la pregunta No. 10 del cuestionario previo.

## Segunda aplicación

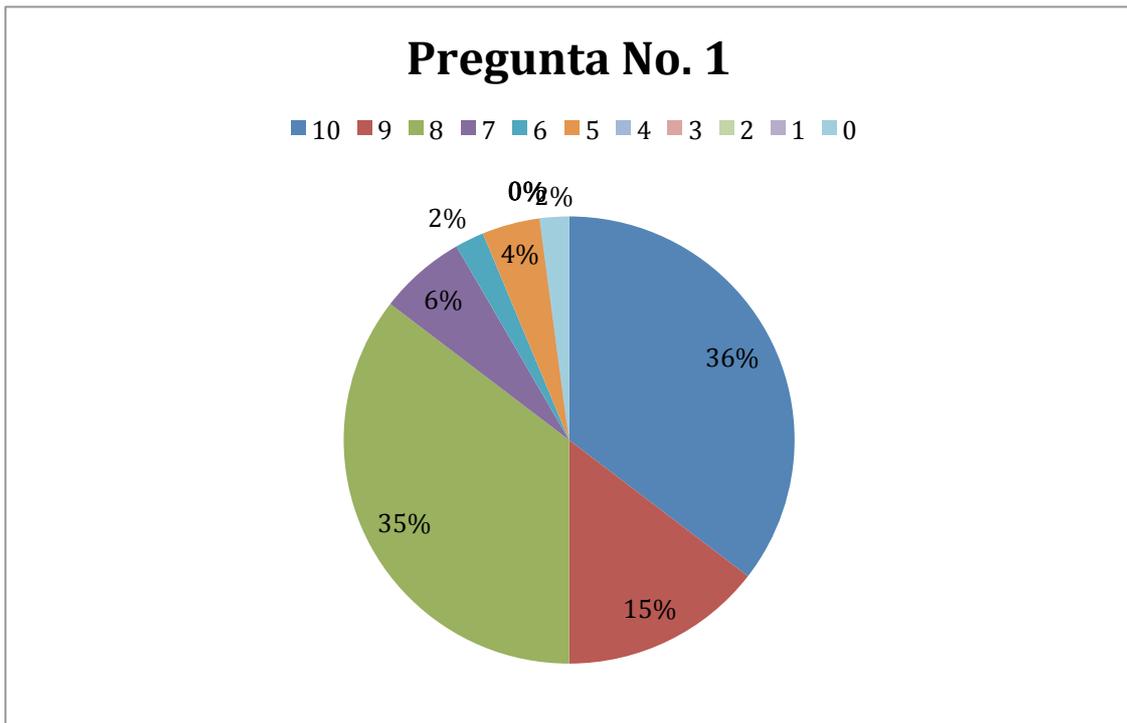
A continuación se exponen los resultados obtenidos en la segunda aplicación del cuestionario o aplicación posterior, es decir, cuando los alumnos ya habían leído el artículo proporcionado y realizado la tarea correspondiente. Las escalas utilizadas en esta aplicación posterior del cuestionario, son las mismas que se utilizaron en la aplicación previa.

### Pregunta No. 1

La gráfica 3.17 muestra que los estudiantes en esta ocasión tienden a otorgarle a la historia de la ciencia una importancia alta en su formación profesional. El promedio obtenido en esta pregunta es de 8.45 en escala de 10 puntos. La gráfica 3.18 muestra la distribución de respuestas de la misma pregunta, y observamos que el 86 por ciento de los alumnos opinaron que conocer la historia de la ciencia tiene una relevancia superior a 8 puntos.



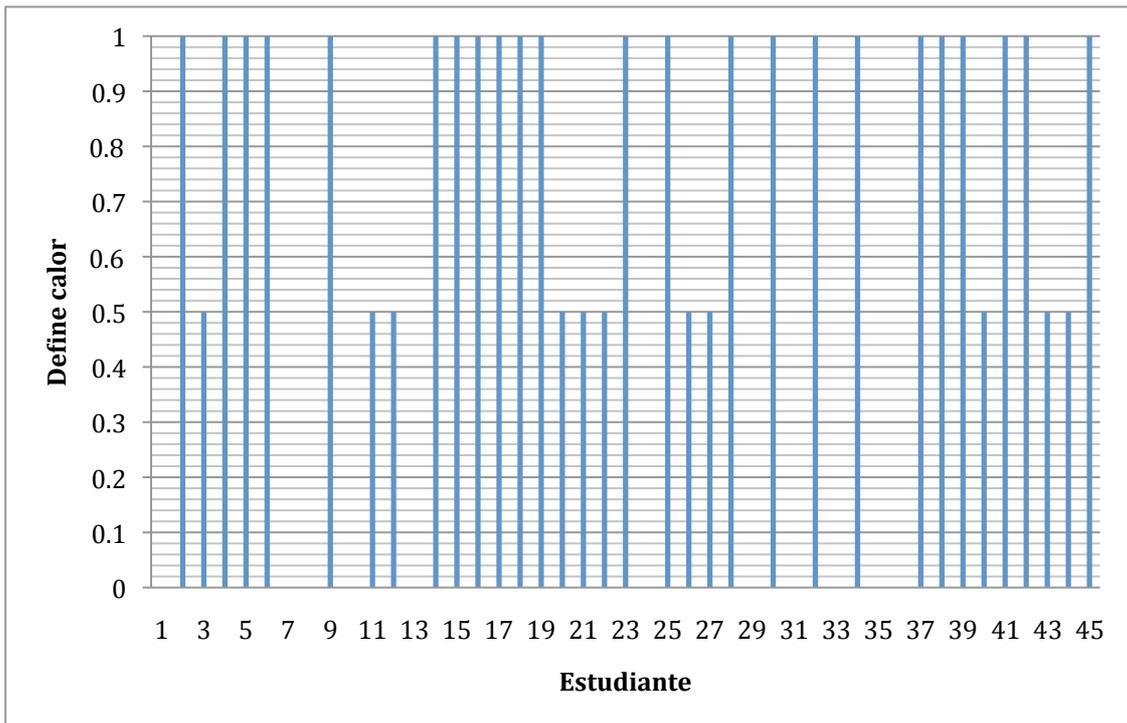
Gráfica 3.17 Respuestas a la pregunta No.1 del cuestionario posterior.



Gráfica 3.18 Distribución de respuestas para la pregunta No.1 del cuestionario posterior.

#### Pregunta No. 2(a)

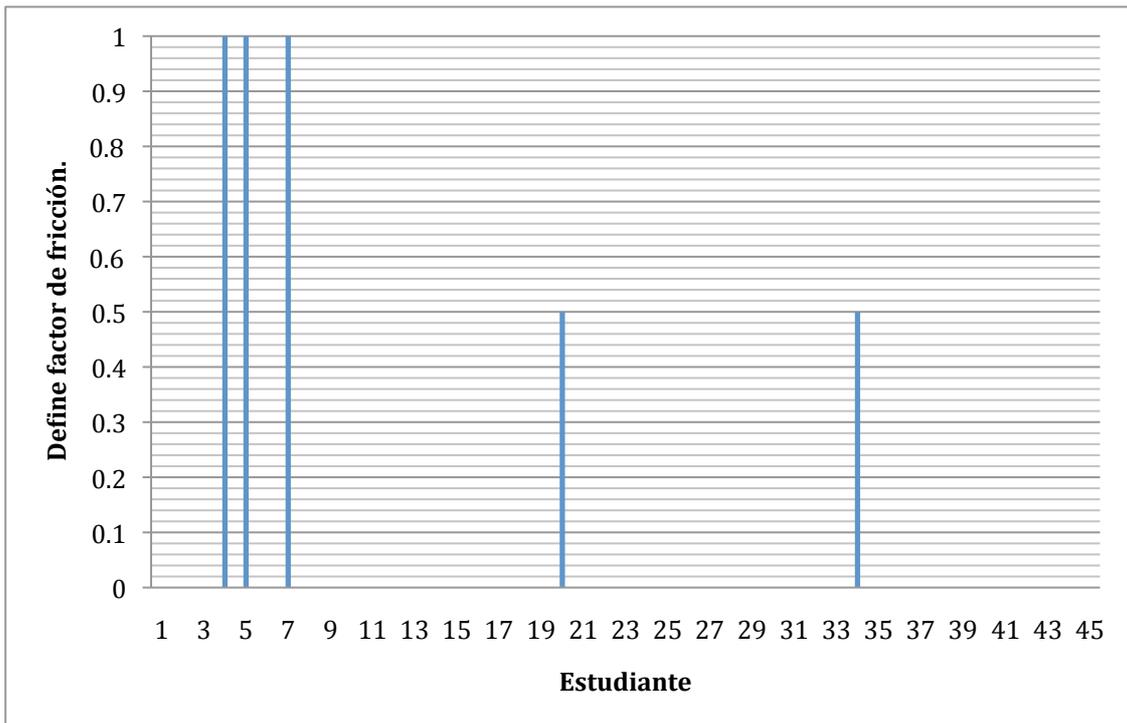
El promedio obtenido a partir de los datos de la gráfica 3.19 para la pregunta 2(a) al definir el concepto de calor es de 0.63, que comparado con el obtenido en la aplicación previa de 0.689, tuvo un cambio de 0.059 puntos hacia abajo, es decir casi no hubo cambio en las respuestas. Esta situación era de esperarse ya que el estudio de dicho concepto no se abordó en clase.



Gráfica 3.19 Respuestas a la pregunta No.2(a) del cuestionario posterior.

Pregunta No. 2(b)

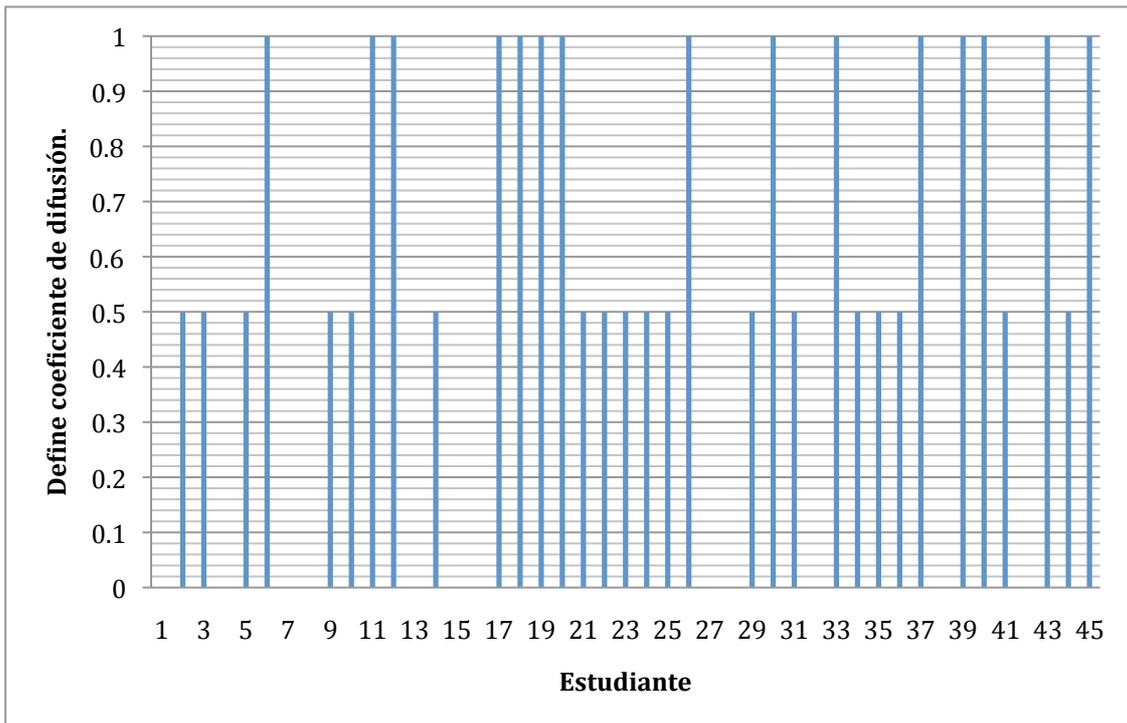
La gráfica 3.20 nos muestra que definir el factor de fricción sigue siendo un problema para los alumnos. El promedio obtenido para esta pregunta es de 0.09 puntos, en el que también hubo una ligera baja con respecto al obtenido en la aplicación previa de 0.11 puntos. Hay que señalar que tampoco se estudió este concepto en la asignatura.



Gráfica 3.20 Respuestas a la pregunta No.2(b) del cuestionario posterior.

Pregunta No. 2(c)

De los datos mostrados en la gráfica 3.21 se obtuvo un promedio de 0.53 puntos, es un resultado que muestra un ligero incremento respecto al obtenido previamente, de 0.45 puntos, reflejando cierta mejoría en las respuestas, atribuible a que el coeficiente de difusión fue objeto de nuestro estudio durante el curso.

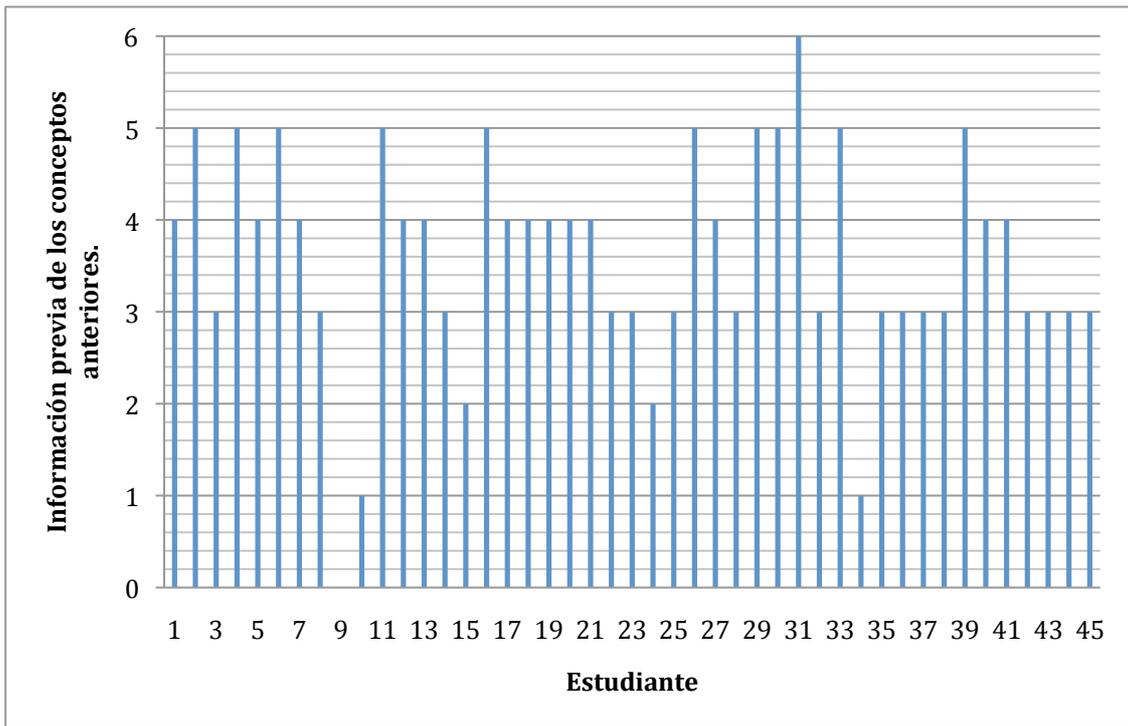


Gráfica 3.21 Respuestas a la pregunta No.2(c) del cuestionario posterior.

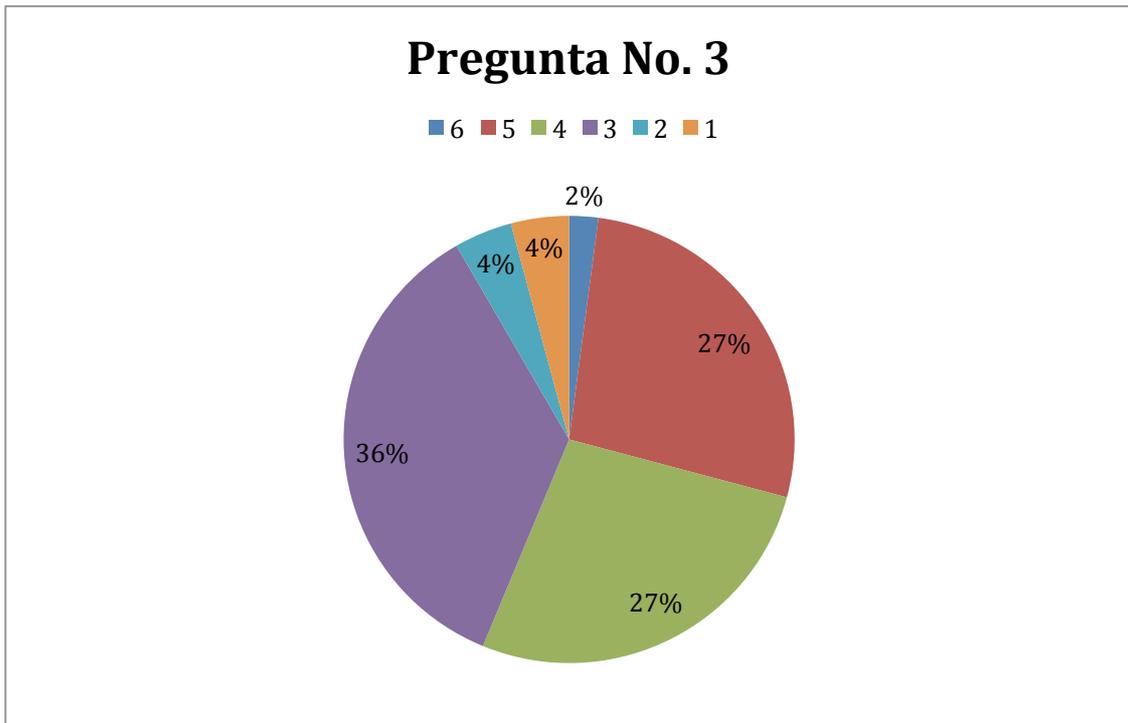
### Pregunta No. 3

La gráfica 3.22 muestra el número de asignaturas en las que los alumnos mencionan haber tenido información de los conceptos de calor, factor de fricción y coeficiente de difusión. El promedio obtenido de la información de ésta gráfica es de 3.68 puntos.

En la gráfica 3.23 se muestra la distribución porcentual de dicha información, como puede observarse el 92 por ciento de los alumnos indica haber tenido información en al menos tres asignaturas.



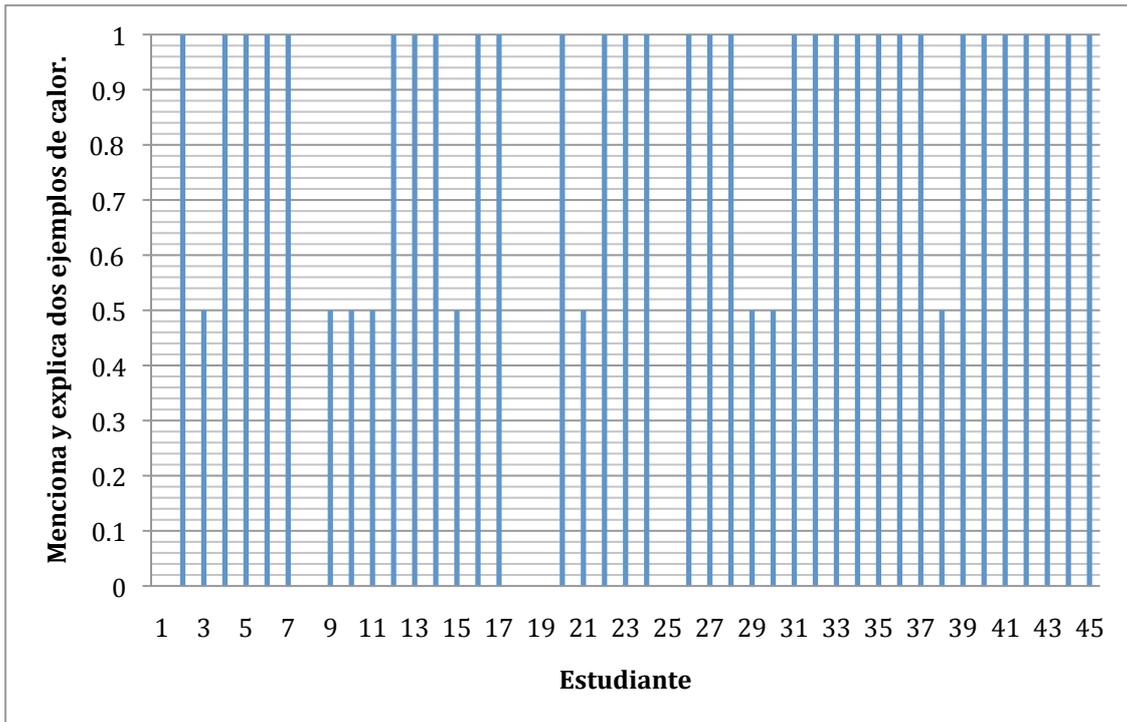
Gráfica 3.22 Respuestas a la pregunta No.3 del cuestionario posterior.



Gráfica 3.23 Distribución de respuestas para la pregunta No.3 del cuestionario posterior.

#### Pregunta No. 4

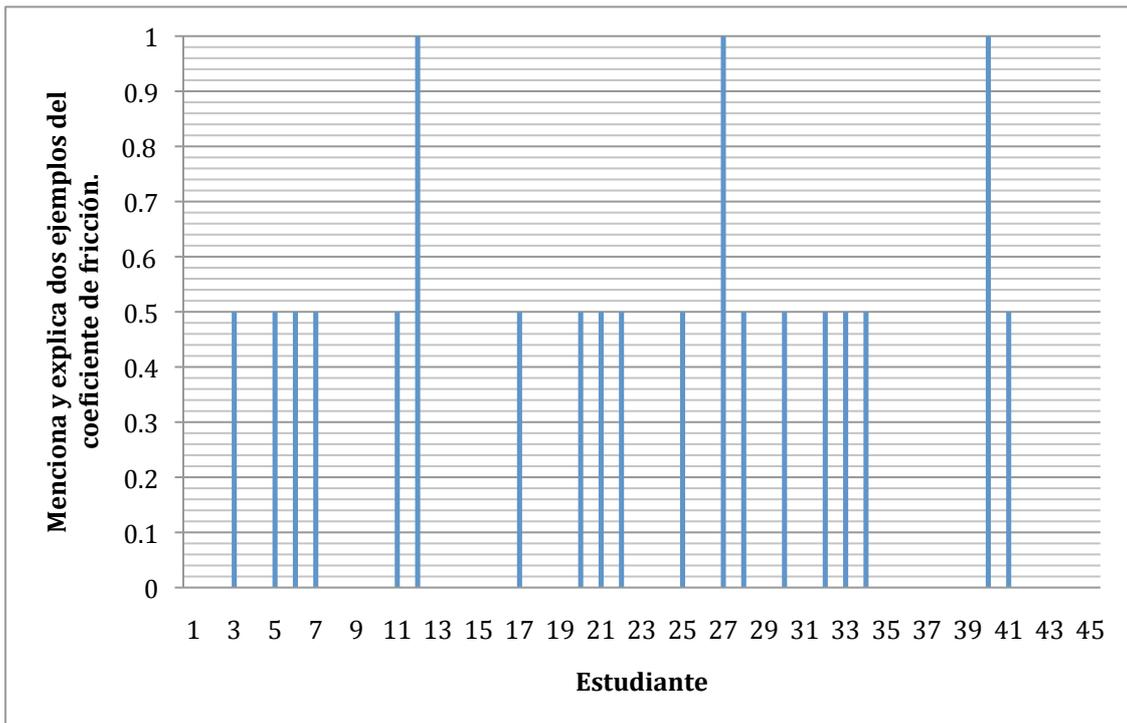
De la información de la gráfica 3.24 se obtuvo un promedio de 0.789 puntos de 1, lo que refleja una disminución con respecto a la aplicación previa de 0.055 puntos, es decir, las respuestas para indicar dos ejemplos de aplicación de calor en ingeniería no sufrieron un cambio significativo.



Gráfica 3.24 Respuestas a la pregunta No.4 del cuestionario posterior.

#### Pregunta No. 5

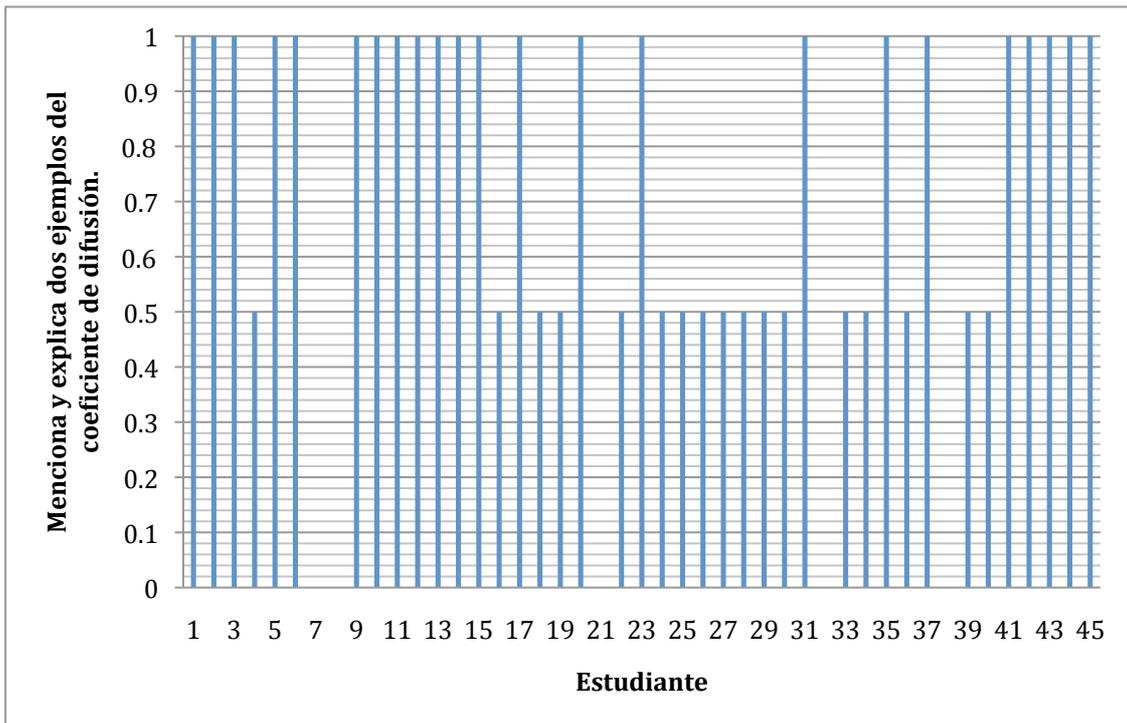
La gráfica 3.25 nos muestra las respuestas referentes a mencionar dos ejemplos de aplicación del factor de fricción en la ingeniería metalúrgica, obteniéndose un promedio de 0.244 puntos. Dicho resultado comparado con el de la aplicación previa de 0.3 muestra que tampoco hubo una discrepancia significativa en los resultados.



Gráfica 3.25 Respuestas a la pregunta No.5 del cuestionario posterior.

Pregunta No. 6

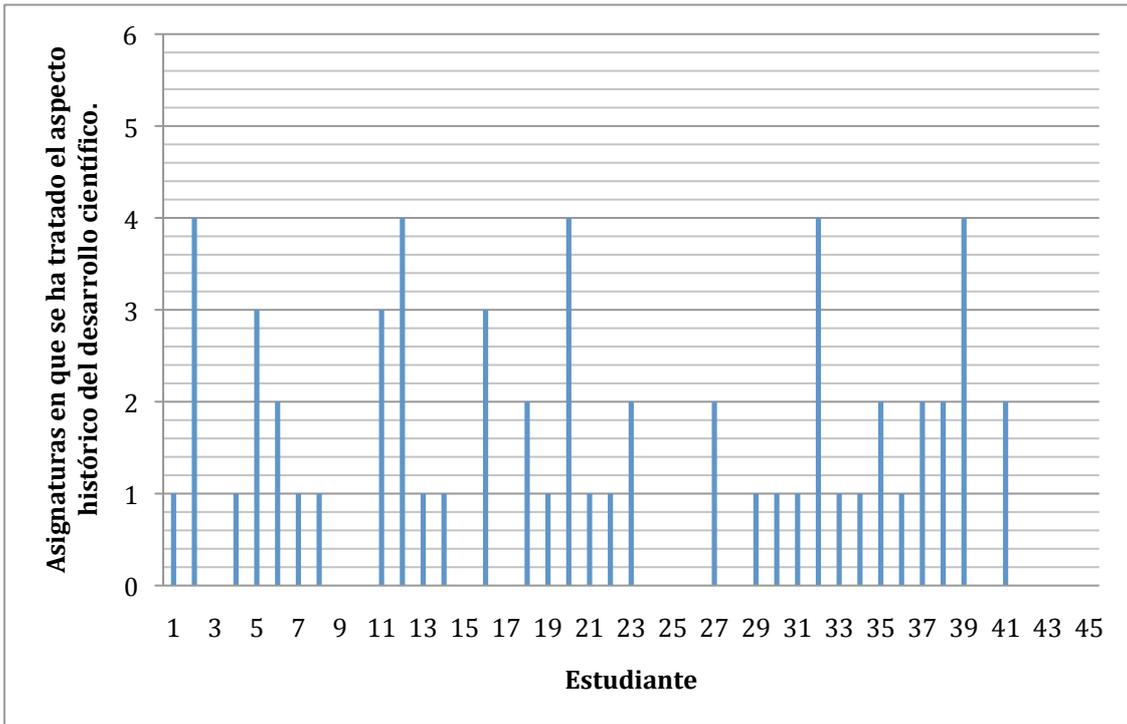
En la gráfica 3.26 se observa que varios de los alumnos contestaron correctamente la pregunta referente al coeficiente de difusión, el promedio obtenido de ésta información es de 0.944 puntos de 1; comparado con el obtenido en la aplicación previa de 0.489, vemos que en este caso sí hubo una importante modificación positiva.



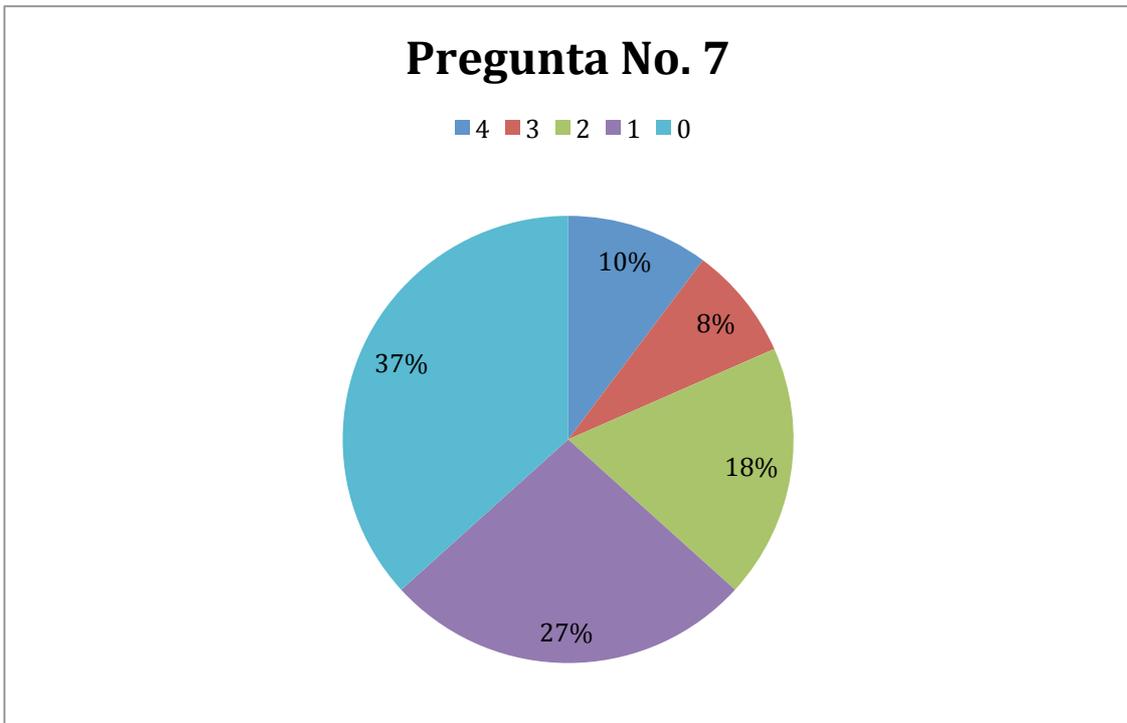
Gráfica 3.26 Respuestas a la pregunta No.6 del cuestionario posterior.

#### Pregunta No. 7

Con respecto a la pregunta No. 7 referente a si en alguna asignatura se ha tratado el aspecto histórico de la evolución científica o tecnológica, observamos en la gráfica 3.27 que la mayor parte de los alumnos menciona que en al menos una asignatura han tratado dicho tema. El promedio es de 1.33 asignaturas. La gráfica 3.28 nos muestra la distribución porcentual y observamos que el 63 por ciento de los alumnos menciona sí haber tenido información al respecto, mientras que el 37 por ciento responde negativamente.



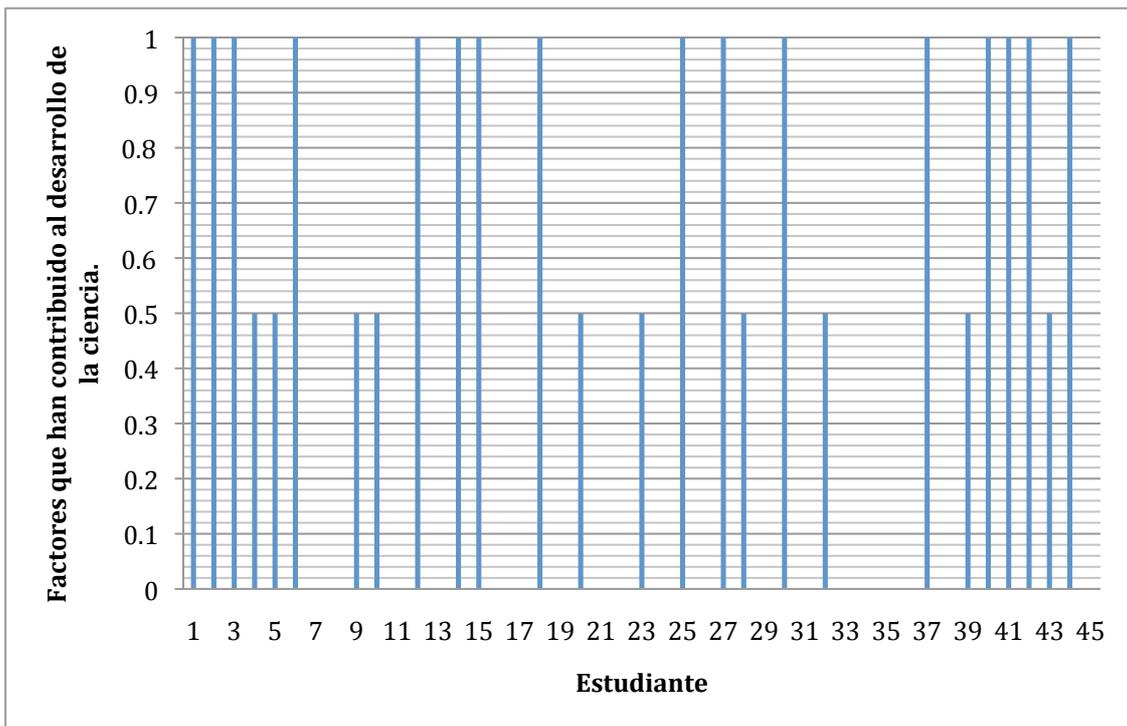
Gráfica 3.27 Respuestas a la pregunta No.7 del cuestionario posterior.



Gráfica 3.28 Distribución de respuestas para la pregunta No.7 del cuestionario posterior.

### Pregunta No. 8

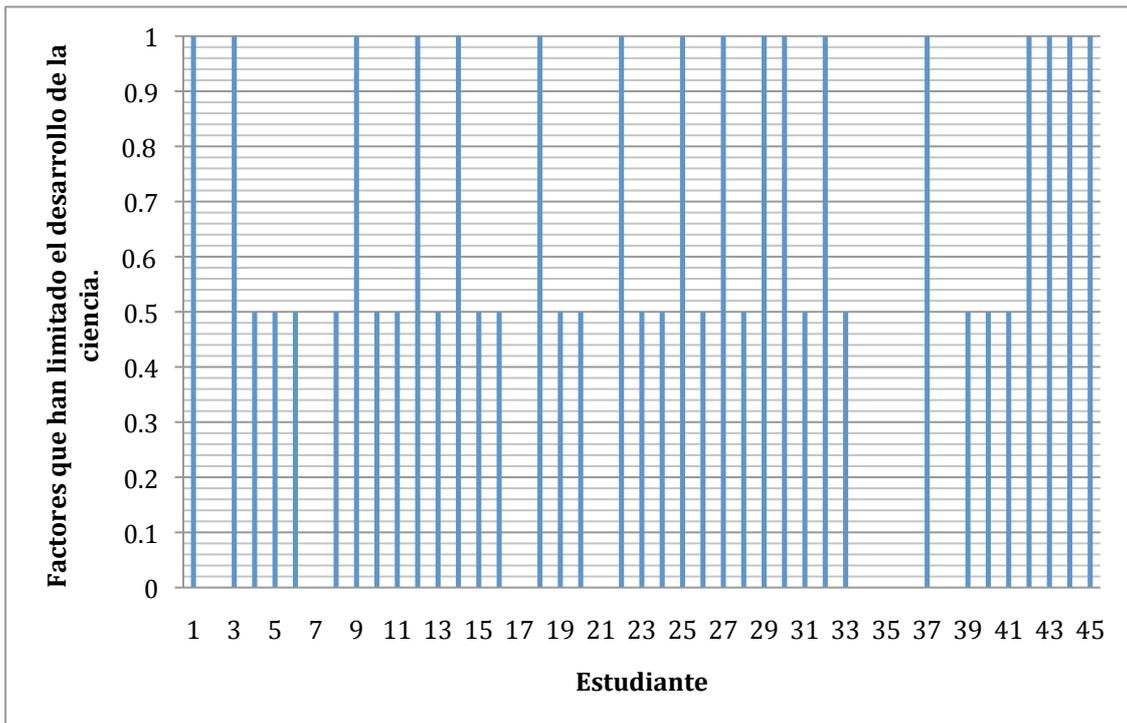
En la gráfica 3.29 se observa que la mayoría de los alumnos tienen una idea regular con respecto a los factores que han contribuido al desarrollo de la ciencia y tecnología. El promedio obtenido de las respuestas es de 0.467 puntos, resultando idéntico al obtenido en la aplicación previa del cuestionario.



Gráfica 3.29 Respuestas a la pregunta No.8 del cuestionario posterior.

### Pregunta No. 9

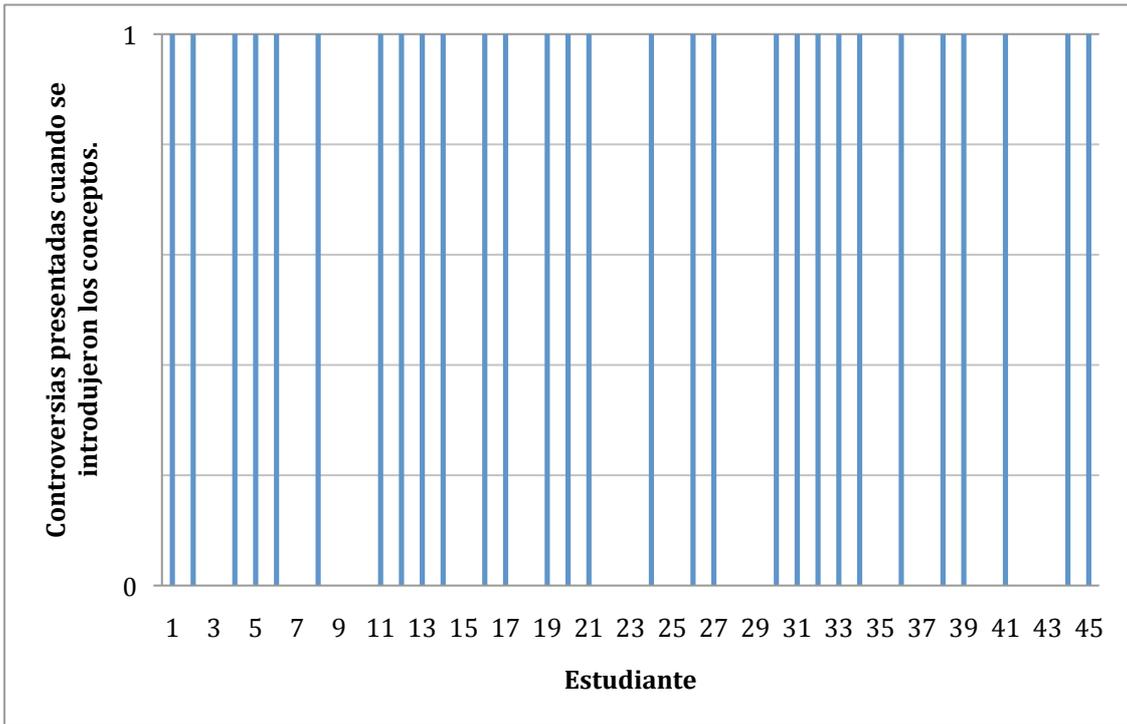
La gráfica 3.30 muestra que se mantiene una tendencia regular para señalar factores que limitan el desarrollo científico y tecnológico. El promedio extraído de los datos de la presente gráfica es de 0.6 puntos, que al igual que en la pregunta anterior, se mantuvo constante con respecto al obtenido en la aplicación previa del cuestionario.



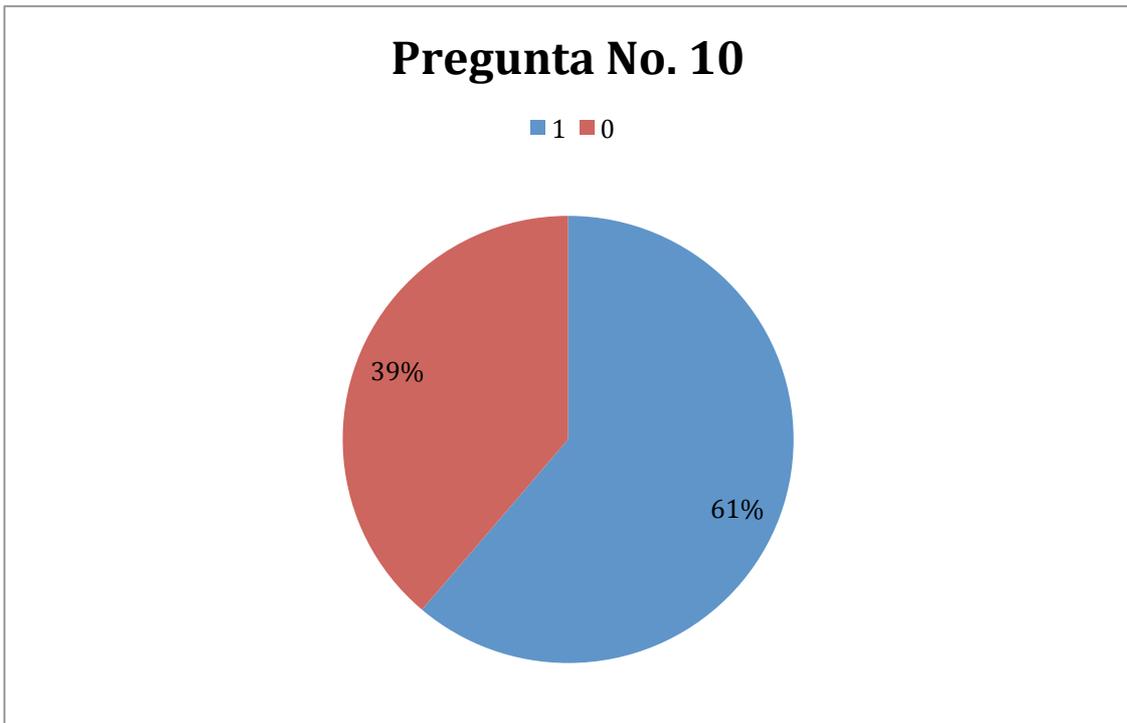
Gráfica 3.30 Respuestas a la pregunta No.9 del cuestionario posterior.

Pregunta No. 10

La gráfica 3.31 nos muestra que una gran parte de los alumnos refiere conocer alguna controversia cuando se presentó por primera vez alguno de los conceptos en cuestión. El promedio de respuestas afirmativas es de 0.644 puntos. En la gráfica 3.32 vemos la representación porcentual de las respuestas notando que el 61 por ciento de los estudiantes respondió afirmativamente, lo que representa un aumento de casi el doble con respecto al obtenido en la aplicación previa, siendo ese valor de 36 por ciento.



Gráfica 3.31 Respuestas a la pregunta No.10 del cuestionario posterior.



Gráfica 3.32 Distribución de respuestas para la pregunta No. 10 del cuestionario posterior.

A partir de los resultados anteriores y con respecto a la pregunta No. 1, que valora la importancia otorgada por los alumnos el conocer la historia de la ciencia en su formación académica, se obtuvo una diferencia en el promedio de 0.84 puntos entre la primera y la segunda aplicación del cuestionario, quedando un promedio final de 8.45 puntos en escala del 0 (ninguna importancia) al 10 (muchísima importancia). En términos de porcentaje, la diferencia fue del 17 por ciento de incremento en los alumnos que le otorgan una importancia a la historia de la ciencia superior a 8 puntos, lo que refleja en forma positiva las actividades realizadas en clase.

Las preguntas No. 2(a) y No. 2(b) donde se pide definir los conceptos de calor y de factor de fricción respectivamente, casi no cambiaron sus valores entre las aplicaciones, sin embargo como se mencionó anteriormente, resulta interesante destacar el hecho de que a los alumnos se les dificultó más definir el concepto de factor de fricción que el de calor, a pesar de que ambos conceptos les son conocidos y los han utilizado desde el nivel de secundaria. Pensamos que valdría la pena se realizara una investigación al respecto.

La pregunta No. 2(c) tuvo un incremento en su promedio de 0.08 puntos en la escala de 0 a 1, lo que representa un 18 por ciento aproximadamente, y que como se mencionó antes, se explica por el hecho de que el coeficiente de difusión fue objeto de estudio durante el curso.

La pregunta No.3 en la que se busca saber si los estudiantes han tenido información previa de los conceptos en cuestión, tuvo un incremento del 3 por ciento en el promedio, es decir, del 89 aumentó al 92 por ciento, lo que se traduce en que el número de asignaturas donde los alumnos mencionan haber tenido información de dichos conceptos es alrededor de 4.

Las preguntas No.4 y No.5 referentes a mencionar y explicar dos ejemplos de aplicación en ingeniería metalúrgica de los conceptos de calor y del factor de fricción, se mantuvieron muy similares en sus promedios previo y posterior, aunque revelan que los alumnos pueden expresar más fácilmente ejemplos de calor que del factor de fricción. Como podemos observar este resultado es congruente con el obtenido en las preguntas No. 2(a) y No. 2(b).

En la pregunta No.6 se pide a los alumnos mencionar dos ejemplos de aplicación del coeficiente de difusión. En este caso se obtuvo una diferencia

en el promedio de 0.455 puntos en la escala de 0 a 1 punto superior en la aplicación posterior con respecto a la aplicación previa del cuestionario.

Este hecho también se explica porque los alumnos estudiaron en esta asignatura el coeficiente de difusión.

En la pregunta No.7 no se vio reflejado ningún cambio en cuanto al número de asignaturas que los estudiantes mencionan haber tratado el aspecto histórico de la evolución científica o tecnológica, pues el promedio se mantuvo en 1 asignatura.

Respecto a las preguntas No.8 y No.9 en las que se pide mencionar factores que han contribuido y limitado, respectivamente, el desarrollo de la ciencia y la tecnología no se verificó cambio alguno entre las aplicaciones del cuestionario, observándose que les fue más fácil a los alumnos mencionar factores que limitan que los que contribuyen al desarrollo de los mismos.

La pregunta No.10 que está orientada a saber si los alumnos conocen alguna controversia existente cuando se presentaron por primera vez los conceptos referidos, tuvo un cambio muy significativo, pues el 36 por ciento de alumnos que expresaron y explicaron alguna controversia en algún concepto en la aplicación previa del cuestionario, aumentó al 61 por ciento en la aplicación posterior, es decir, se verificó un aumento algo superior al 50 por ciento entre las aplicaciones. Lo anterior se explica por el artículo proporcionado a los alumnos y la tarea correspondiente.

## Conclusiones

1. A partir del análisis de los resultados se observa que en la aplicación previa del cuestionario, el 69 por ciento de los alumnos menciona que conocer el aspecto histórico del desarrollo científico y tecnológico para su formación, tiene una importancia superior a 8 puntos en una escala de 0 (ninguna importancia) a 10 (mucho importancia), sin embargo, no es posible precisar en esta investigación si las respuestas de los estudiantes fueron producto de un conocimiento adquirido anteriormente a través de alguna otra asignatura, o bien por mera intuición. En la segunda aplicación del cuestionario dicho porcentaje aumentó al 86 por ciento, por lo que se infiere que las actividades en clase orientadas hacia el estudio del aspecto histórico del desarrollo de conceptos científicos tuvieron un impacto positivo en los estudiantes en este rubro.
2. Los alumnos manifiestan haber tenido información previa sobre los conceptos de calor, factor de fricción y coeficiente de difusión, sin embargo al pedirles que los definan y que mencionen ejemplos, se obtuvieron respuestas con promedios muy bajos, como puede observarse en las respuestas a las preguntas No. 2(a), 2(b), 2(c), 4, 5 y 6 en ambas aplicaciones del cuestionario. A partir de lo anterior, se infiere que los alumnos en su proceso de formación presentan mayor preocupación por manejar el aspecto matemático de los conceptos, que por la interpretación de los resultados. Esto refleja que a nivel docente, no se ha logrado desarrollar satisfactoriamente en los alumnos su capacidad de análisis para lograr una completa integración del manejo matemático de conceptos y su capacidad crítica.
3. Se observan dificultades para mencionar factores que han contribuido y factores que han limitado el desarrollo científico o tecnológico en ambas

aplicaciones del cuestionario, aun cuando los alumnos refieren que en al menos una asignatura de las que han cursado hasta el momento de la aplicación previa del cuestionario, han tratado el aspecto histórico del desarrollo mencionado. Es posible que estas dificultades se derivan de la escasa importancia que se le brinda al estudio de estos temas, principalmente en las profesiones de corte tecnológico.

4. En la pregunta No.10 del cuestionario es donde se registró el mayor impacto en términos de porcentaje entre las aplicaciones del cuestionario, ya que el 36 por ciento de alumnos que decían conocer alguna controversia cuando se presentaron por vez primera los conceptos referidos, se incrementó al 61 por ciento. De este resultado se puede inferir que se logró concientizar a una cantidad significativa de alumnos sobre este tema y, particularmente, en el de la historia del desarrollo del coeficiente de difusión.
  
5. El hecho de que un estudiante señale que desconoce alguna controversia en la presentación por primera vez de uno o varios conceptos científicos, no implica que los desconoce o no los sabe utilizar, sino más bien refleja un desconocimiento del proceso histórico del desarrollo de los mismos. Con la presente investigación si bien es difícil determinar si se obtuvo un cambio conceptual, en cuanto a la idea que tenía nuestra población de la importancia de la historia de la ciencia en su formación académica, debido a las limitaciones de tiempo para la construcción y piloteo de instrumentos más refinados para tal efecto, pienso haber logrado, con base en los resultados obtenidos, un perfil epistemológico en el sentido bachelardiano del término. Al mismo tiempo, se han detectado algunos temas que dan pauta a investigaciones futuras, por ejemplo, los relacionados con la formación docente en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM, y aquellos que se enfocan en las ideas previas que los alumnos tienen de algunos conceptos científicos como tales.

6. Con respecto al tema de la formación docente, sugiero investigar el efecto que han tenido los cursos de pedagogía ofrecidos a los profesores del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM en su práctica, y en su caso, evaluar dicho efecto en los estudiantes; con respecto a las ideas previas de los estudiantes sobre diferentes conceptos científicos, pienso sería de gran utilidad investigar si se logra obtener en ellos un perfil epistemológico o un cambio conceptual de dichos conceptos, a través de la historia de la ciencia.

## BIBLIOGRAFÍA

Ausubel, D. (1980). *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. México: Trillas.

Bachelard, G. (2000). *La formación del espíritu científico* (23ª ed.). México: Siglo XXI.

\_\_\_\_ (2003). *La filosofía del no* (1ª ed. 4ª reimp.). Buenos Aires: Amorrortu.

Bello, S. (coord.) (2008). *Hacia el cambio conceptual en el enlace químico* (1ª ed.). México: UNAM / Fac. Química.

Brown, H.I. (1979) *Perception, Theory, and Commitment: The new philosophy of science*. Chicago: The University of Chicago Press.

Bush, D. (1960). "Science and the Humanities". en Blanshard, B. (comp.). *Education in the age of science*. New York: Basic Books. Cap.4 pp.167-187.

Campanario, J. M. y Otero, J. C. (2000). "Más allá de las ideas previas como dificultades de aprendizaje: las pautas de pensamiento, las concepciones epistemológicas y las estrategias metacognitivas de los alumnos de ciencias". En: *Enseñanza de las ciencias*, 18(2), pp. 155-171.

Carey, S. (1991). "Knowledge Acquisition: Enrichment or Conceptual Change", en Carey, S. and Gelman R. (editors). *The Epigenesis of Mind: Essays on Biology and Cognition*. New Jersey: USDA. pp. 257-292.

Carnap, R. (1988). *La construcción lógica del mundo* (1ª ed. en español). México: UNAM.

Carretero, M. (2002). *Construir y enseñar las ciencias experimentales*. (3ª ed. 2ª. Reimp.). Argentina: Aique.

Castorina, J. A. (1998). "Aprendizaje de la ciencia: constructivismo social y eliminación de los procesos cognoscitivos", en *Perfiles Educativos*, vol. XX. pp. 24-39.

Chi, M., Slota, D. and Leeuw, N. (1994). "From things to processes. A theory of conceptual change for learning science Concepts". *Learning and Instruction*, vol. IV, (1), pp. 27-44.

Coll, C. (1990). "Un marco de referencia psicológico para la educación escolar. La concepción constructivista del aprendizaje y de la enseñanza", en Marchesi, Coll y Palacios (comps.). *Desarrollo psicológico y educación II. Psicología de la educación*. Madrid: Alianza.

Confrey, J. (1990). "What constructivism implies for teaching", en R. Davis, C. Maher y N. Nodding (comps). *Constructivist Views on the Teaching and Learning of Mathematics*. Reston: National Council of Teachers of Mathematics. pp. 107-124.

Costamagna, A. (2005). "Innovaciones didácticas. El valor de la metaevaluación del cambio conceptual: una experiencia didáctica". En: *Enseñanza de las Ciencias*, vol. XXIII, (3), pp. 419-430.

Díaz-Barriga, F. y Hernández, G. (2002). *Estrategias docentes para un aprendizaje significativo* (2ª ed.). México: Mc. Graw Hill.

DiSessa, A. (2008). "A bird's-eye view of the pieces vs. coherence controversy", en *International handbook of research on conceptual change*. Greece: edited by Stella Vosniadou. pp.35-60.

DiSessa, A. and Sherin, B. (1998). "What changes in conceptual change?". En *International Journal of Science Education*, vol. 20. pp.115-191.

Driver, R. y Oldham, V. (1986). "A constructivist approach to curriculum development in science". En: *Studies in Science Education*. vol. 13. pp. 105-122.

Feyerabend, P. (2003). *Tratado contra el método* (4ª ed.). España: Tecnos.

\_\_\_ (1996). *Adiós a la razón*. (3ª ed.). España: Tecnos.

Flores, F. (2003). "Modelos conceptuales de las concepciones físicas de los estudiantes. Enfoques y perspectivas" en Flores F. y Aguirre, M. A. En: *Educación en física. Incursiones en su investigación*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

\_\_\_ (2004). "El cambio conceptual: interpretaciones, transformaciones y perspectivas". *Educación Química*, vol. XV, (3). pp. 256-269.

\_\_\_ (2000). "La enseñanza de las ciencias. Su investigación y sus enfoques". En: *Ethos Educativo*, vol. 24, p.30.

\_\_\_ (2003). "Representation of the cell and its processes in high school students: an integrated view". En: *International Journal of Science Education*, vol. 25, (2), pp. 269-286.

Fourez, G. *La construcción del conocimiento científico*. (3ª ed.). España: Narcea, s-f.

Garrison, J. W. (1986). "Some principles of postpositivist philosophy of science". En: *Educational Researcher*, vol.15, (9), pp. 12-18.

Gil, P. y Ozamiz, M. (2001). *La enseñanza de las ciencias y la matemática*. España: Popular.

Glaserfeld, E. Von. (1990). "Environment and Communication", en L. P. Steffe y T. Wood (comps), *Transforming Children's Mathematics Education: International Perspectives*, Hillsdale: Lawrence Erlbaum.

\_\_\_ (1989). "Cognition, Construction of Knowledge, and Teaching", *Synthese*, vol. 80. (1), pp. 121-140.

\_\_\_ (1987). *The construction of knowledge*. Seaside: Intersystem's Publications.

Hempel, G. CARL. (2003). *Filosofía de la ciencia natural*. (3ª reimp.). España: Alianza Editorial.

Hessen, J. (2004). *Teoría del conocimiento*. México: Época.

Kuhn, T. S. (2004). *La estructura de las revoluciones científicas*. (2ª ed.). México: FCE.

Lakatos, I. (2002). *Escritos filosóficos I. La metodología de los programas de investigación*. (1º ed.). España: Alianza Editorial.

Lemke, J. (1997). *Aprender a hablar ciencia*. Barcelona: Paidós.

Martí, E. y García-Mila. (2007). "Cambio conceptual y cambio representacional desde una perspectiva evolutiva. La importancia de los sistemas externos de representación". En Pozo, J. y Flores, F. (coord.). *Cambio conceptual y representacional en el aprendizaje y la enseñanza de la ciencia*. España: Antonio Machado Libros.

Martínez, S. F. (2007). "La representación de lo contingente en las explicaciones científicas" en Suárez, D. E. (comp.). En: *Variedad infinita*

*ciencia y representación. Un enfoque histórico y filosófico.* (1ª ed.) México: Universidad Nacional Autónoma de México / Limusa Noriega.

Matthews, M. R. (1994). "Constructivism and Science Education" en *Science Teaching. The Role of history and Philosophy of Science*, (7). pp. 137-161 y 227-230. en Martínez, S. F. y Guillaumin, G. (2005). *Historia, filosofía y enseñanza de la ciencia*. México: Universidad Nacional Autónoma de México / Instituto de Investigaciones Filosóficas.

\_\_\_ (2001). "How pendulum studies can promote knowledge of the nature of science" en *Journal of Science Education and Technology*, Vol. X. (4), pp.359-368.

Morin, E.(2001). *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*. México: UNESCO.

\_\_\_ (2006). *El método 3. El conocimiento del conocimiento*. (5ª ed.). España: Cátedra.

Nagel, E. (1960). "Science and the humanities" en Blanshard, B. *Education in the age of science*. (2ª ed.). U.S.A.: Basic Books.

Nersessian, N. (1984). *Faraday to Einstein: Constructing Meanings in Scientific Theories*. Holanda: Martinus.

\_\_\_ (1992). "How do scientist think?. Capturing the dynamics of conceptual change", in Giere, R., (editor). *Cognitive Models of Science*, Minnesota Studies in the Philosophy of science vol. XV. pp. 3-44.

Perkins, D. (1992). *La escuela inteligente*. Barcelona: Gedisa.

Piaget, J., García, R. (2004). *Psicogénesis e historia de la ciencia*. (10ª ed.). México: Siglo XXI.

Popper, K. R. (2001). *La lógica de la investigación científica*. (12ª reimp.). España: Tecnos.

Pozo, J. I. (1999). "Más allá del cambio conceptual: el aprendizaje de la ciencia como cambio representacional". *Enseñanza de las ciencias*, vol. XVII. (3). pp. 513-520.

Pozo, J. I. y Flores, F. (coord.). (2007). *Cambio conceptual y representacional en el aprendizaje y la enseñanza de la ciencia*. España: A. Machado Libros.

Reale, G. y Antiseri, D. (2002). *Historia del pensamiento filosófico y científico*. (3ª ed.). España: Herder.

Sánchez, L. (2002). "Diversos términos sobre el conocimiento lego del alumno: ¿uno o varios significados?", en *Perfiles Educativos*, vol. XXIV, pp. 50-67.

Rodrigo, M. J. (1985). "Las teorías implícitas en el conocimiento social" en *Infancia y Aprendizaje*, (31-32).

Shapere, D. (1965) "Philosophical problems of natural science" en Olive, L. y Pérez, A. R. (1989). *Filosofía de la ciencia: teoría y observación*. México: Siglo XXI / UNAM.

Suppe, F. (comp.). (1977). *The structure of scientific theories*. University of Illinois Press, Urbana.

Vosniadou, S. (1994). "Capturing and modeling the process of conceptual change.". En *Learning and instruction*, (4), pp. 45-69.

\_\_\_\_ (2008). "The Framework theory approach to the problem of conceptual change". En *International handbook of research on conceptual change*. Greece: edited by Stella Vosniadou. pp.3-33.

Vosniadou, S. and Brewer, W. (1992). "Mental models of the Earth: A study of conceptual change in childhood". En: *Cognitive Psychology*, (24), pp. 535-585.

Vygotsky, L., Kozulin, A. (1995). *Pensamiento y lenguaje*. (1ª ed.). España: Piados Ibérica.

## ANEXO 1

Asignatura:

Fecha:

Semestre que cursas: 201\_\_ - \_\_

### Cuestionario

El siguiente cuestionario es con fines de *investigación educativa*, no influye en tu evaluación para este curso; por favor contesta lo más claramente posible y con honestidad. Te agradecemos el apoyo.

NOMBRE: \_\_\_\_\_

EDAD: \_\_\_\_\_

SEXO: Masculino \_\_\_\_\_ Femenino \_\_\_\_\_

ESTUDIOS PREVIOS

a) CCH \_\_\_\_\_ b) PREPARATORIA \_\_\_\_\_

c) OTRO (especifica) \_\_\_\_\_

Semestre que cursas (p.ej.: 5º) \_\_\_\_\_

ALUMN@: a) REGULAR \_\_\_\_\_ b) IRREGULAR \_\_\_\_\_

1- En tu experiencia como alumn@ de Ingeniería Química Metalúrgica ¿qué importancia tiene conocer la historia de la ciencia para mejorar tu formación académica? (0 = ninguna importancia, 10 = mucha importancia) ¿por qué?

---

---

---

---

2.- Define:

a) Calor: \_\_\_\_\_

b) Factor de fricción \_\_\_\_\_

c) Coeficiente de difusión: \_\_\_\_\_

3.- En algunas asignaturas quizás hayas tenido información de estos conceptos, ¿en cuáles y de qué forma?

1) \_\_\_\_\_

2) \_\_\_\_\_

3) \_\_\_\_\_

4) \_\_\_\_\_

5) \_\_\_\_\_

4.- **Menciona y explica** brevemente dos ejemplos de aplicación de “calor” que consideres sean relevantes en ingeniería metalúrgica.

1)  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

2)  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

5.- **Menciona y explica** dos ejemplos de aplicación del coeficiente de fricción que consideres sean relevantes en ingeniería metalúrgica.

1)  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

2)  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

6.-**Menciona y explica** dos ejemplos de aplicación del “coeficiente de difusión” que consideres sean relevantes en ingeniería metalúrgica.

1)

---

---

2)

---

---

7.-¿En alguna asignatura han tratado el aspecto histórico del desarrollo científico o tecnológico? En caso afirmativo menciona en cuál o cuáles.

a) Si \_\_\_\_\_ b) No \_\_\_\_\_

---

---

---

---

8.-Enlista factores que creas han contribuido al desarrollo de la ciencia y la tecnología.

1) \_\_\_\_\_

2) \_\_\_\_\_

3) \_\_\_\_\_

4) \_\_\_\_\_

9.-Enlista factores que creas han limitado el desarrollo de la ciencia y la tecnología

1) \_\_\_\_\_

2) \_\_\_\_\_

3) \_\_\_\_\_

4) \_\_\_\_\_

10.- ¿Sabes si los conceptos de calor, factor de fricción y/o coeficiente de difusión causaron alguna controversia cuando se presentaron por primera vez?

Si \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

En caso afirmativo: ¿cuáles? **Explica.**

---

---

---

---

---

### One and a Half Century of Diffusion: Fick, Einstein, Before and Beyond

*Jean Philibert*

Former Professor of Materials Science  
Université Paris-Sud/Orsay  
e-mail: jean.philibert@lpces.u-psud.fr

Extended version of Jean Philibert's contribution to the Proceedings of Diffusion Fundamentals I, Leipzig, 2005

#### Abstract

The year 2005 gave us, through two anniversaries (1855 Fick and 1905 Einstein), the wish to go back to these authors' seminal papers, whose aftermath had been (and still is) prodigious. This essay describes the contents of these articles: the macroscopic approach with Fick equations and the microscopic one with the Einstein-Smoluchowski random walk (Brownian motion) equation, while considering them in their historical context. Some further developments are briefly discussed.

#### Keywords

Fick equations, history, random walk, Brownian motion, Einstein-Smoluchowski equation, Arrhenius equation.

#### I - INTRODUCTION

It always comes as a surprise, when one looks back at the genesis of concepts and models we are now so familiar with, to discover how prone we are to consider them as quite obvious. Reading old publications, we realise how these "evidences" required decades – perhaps centuries – of approximations, errors, intuitions, advances and recessions... We also realise how dangerous and counterproductive certain dogmas (and scholars!) are: the quarrel of energetists and atomists gives a perfect illustration of the danger of dogmatism. Diffusion was at the heart of these quarrels.

Another surprise is worth to be underlined: understanding the elementary processes, i.e. the microscopic world, is not compulsory for the derivation of reliable macroscopic laws. What did Fourier know about the nature of heat, Ohm about electricity, Fick about salt solutions, Darcy about structure of water in pores? The beauty of mathematics allowed them to derive predictive laws, which are the key to the possibility of quantitative experiments and engineering applications.

In the case of diffusion, the bridge between the microscopic and macroscopic world was built by A. Einstein: his fundamental result expresses a macroscopic quantity – the coefficient of diffusion – in terms of microscopic data (elementary jumps of atoms or molecules). As an offspring of the kinetic theory of gases, Brownian motion was the key to decipher the microscopic world, first in gases and liquids, and later on – surely more difficult I admit – in crystalline solids. We are faced here with an incredible convergence: Brownian motion was actually modelled for the first time by a mathematician, Louis Bachelier, who did not consider physical events, but stock-market quotations! We are here facing again the beauty – and power – of mathematics: Brownian motion is a mathematical object, treated in many textbooks, as well

as a physical one allowing us to rationalize natural facts as varied as the flight of birds or mosquitoes, the propagation of diseases, the dissemination of pollutants, the properties of biological membranes, the brain imaging by NMR...

With the benefit of hindsight, it seems rather surprising that scholars of the Enlightenment Century apparently did not question the mechanisms of many technical processes, which are, as we know, controlled by diffusion phenomena. Let us just mention a few ones: "cementation", first used for gold or silver refining – a process attested since several centuries B.C. –, carbon diffusion to produce steel from iron – a process already known in medieval times and perhaps earlier –, diffusion soldering of gold artefacts, the colours of stained glasses or earthenware and china (have a look at the diffusion of copper (green colour) in the glaze of some earthenware artefacts).

## II - THOMAS GRAHAM

The first systematic study of diffusion was due to a Scottish chemist, Thomas Graham (1805-1869). He was born in Glasgow and considered as the "leading chemist of his generation". Let us just mention that Graham was the inventor of dialysis, that he defined as a method of separation, by diffusion through a membrane (1854). His research work on diffusion in gases was performed from 1828 to 1833 and he presented his results to the Royal Society of Edinburgh in 1831. These were later published in the Philosophical Magazine in 1833 [1, 1b]. Let us quote the first lines of his first paper [2]:

"Fruitful as the miscibility of the gases has been in interesting speculations, the experimental information we possess on the subject amounts to little more than the well established fact, that gases of different nature, when brought into contact, do not arrange themselves according to their density, the heaviest undermost, and the lighter uppermost, *but they spontaneously diffuse, mutually and equally, through each other*, and so remain in the intimate state of mixture for any length of time." Graham's law claims that the volumes of gas exchange are inversely proportional to the square root of their masses. Combined with Avogadro's constant, this law allows the determination of the molar masses (in modern language). For this reason, an experimental set-up identical to Graham's was later used by J. Loschmidt in 1863 for his classical measurements on diffusion in a handful of gas couples.

Graham did not only perform the first *quantitative* experiment of diffusion, but moreover the first reliable measurement allowing the determination of a coefficient of diffusion. The notion of coefficient of diffusion was not yet established at this time, not until 26 years later thanks to Fick. But time flowed until 1867, when Maxwell calculated the coefficients of diffusion in gases from the numerical results of Graham! His coefficient of diffusion of CO<sub>2</sub> in air is accurate to ± 5%. Isn't it extraordinary?

Later on, Graham performed a series of diffusion experiments in liquids and noticed that diffusion in liquids is by three orders of magnitude smaller than in gases and that the diffusion rate slowed down with increasing time. But application of his law to solutions of a series of salts appears as a wrong assumption – because of his wrong ideas about the nature of solutions (for a discussion of Graham's ideas, see [1b]).

Graham also studied the uptake of hydrogen by palladium.

## III – ADOLF FICK

Adolf Fick (1829-1901) was born in Kassel (Germany) and very early he intended to study mathematics and physics, so he enrolled at the university of Marburg, but after two years he changed his mind towards medicine. After graduating in medicine, in 1852 he accepted a position as an assistant of Carl Ludwig, a professor of anatomy and physiology in Zürich, where

he remained for 16 years. Later he got a chair of physiology in Würzburg, which he occupied for 31 years.

His contributions to physics are limited to a few years around 1855, – he was then 26 years old – when he published his famous papers on diffusion, establishing the now classical Fick's equation of diffusion. His major field of research was later devoted to the physiology of muscular contraction, but he is also famous for his formula which allows the calculation of the cardiac output. Fick was the author of the first treatise of "Medical Physics"<sup>1</sup>, the first book of this kind, where he discussed biophysical problems, such as the mixing of air in the lungs, the work of the heart, the heat economy of the human body, the mechanics of muscular contraction, the hydrodynamics of blood circulation, etc.. Fick's name remains well known in the history of cardiology. He was also the author of three philosophical essays (cited in [5]).

In the first half of the nineteenth century, the concept of diffusion in liquids was not clear, opinions were rather confused about the dissolution phenomena of salts. The distinction between physical mixture of phases, solutions and compounds came out progressively. In other respects, physiologists became interested in membranes through which osmotic and diffusive processes take place. In 1752 "abbé" Nollet (1700-1770) described an astonishing experiment [3]: a tube full of "wine spirit" (ethanol) closed with a membrane made of pork bladder, was immersed in a vessel of pure water. With increasing time, Nollet observed a bulging of the membrane, water permeating through the membrane, as we understand, to lower the alcohol concentration. Was this property specific of living organisms? – a subject of many discussions (the quarrel of vitalism). The problem of hydrodiffusion through membranes was, according to Fick's German paper, at the origin of his studies on diffusion in solutions – a simple problem to begin with: Let us quote the first sentence of his paper [6a]: "Hydrodiffusion through membranes should captivate the attention of physicists much more than it has been so far, because it is not only one of the basic factors of organic life, but also a process of the highest interest as such". At the same time (1856), quite independently, a French engineer, Henry Darcy (1803-1858), established in a series of experiments the law of water flow through sand beds, i.e. porous media, as being proportional to the pressure difference [4].

Let us come back to diffusion by quoting the first lines of Fick's paper published in the Philosophical Magazine (a paper "translated" from the original one in Poggendorff's Annalen)<sup>2</sup> [6b]: "A few years ago, Graham published an extensive investigation on the diffusion of salts in water, in which he more especially compared the "diffusibility" of different salts. It appears to me a matter of regret, however, that in such an exceedingly valuable and extensive investigation, *the development of a fundamental law, for the operation of diffusion in a single element of space, was neglected, and I have therefore endeavoured to supply this omission.*"

Let us be reminded that a year earlier, Fick published an article on the thermal dilatation of bodies [7], an interesting paper to understand the intellectual substrate of Fick's understanding of the atomistic structure of matter (for a thorough discussion, see [5]). The seminal German paper of 1855 reveals some interesting ideas which do not appear in the English one. Fick made allusion to the atomic theory, as accepted by most of the physicists as an help to get "an insight, a description and a discovery", allowing a mechanical account of the observed phenomena. But we are to be cautious, these ideas about atoms and molecules are very far from our modern concepts. Nevertheless, they were important to understand that dissolution and diffusion processes in water result from the movement of separate entities of salt and water. But Fick was unable on this basis to deduce a quantitative law. It took another fifty years for this ambitious purpose to be realised by A. Einstein. Fick had the idea of proceeding by analogy with heat diffusion – which is nevertheless a marvellous intuition!

<sup>1</sup> *Die medizinische Physik*, Braunschweig, 1856.

<sup>2</sup> Not exactly a direct translation. Introductions for instance are different in the two papers.

Thinking about Graham results, Fick perceived the deep analogy between diffusion and conduction of heat or electricity, a premonitory intuition [6]: “It was quite natural to suppose that this law for diffusion of a salt in its solvent must be identical with that according to which the diffusion of heat in a conducting body takes place; upon this law Fourier founded his celebrated theory of heat, and it is the same that Ohm applied... to the conduction of electricity<sup>3</sup>... according to this law, the transfer of salt and water occurring in a unit of time between two elements of space filled with two different solutions of the same salt, must be, *ceteris partibus*, directly proportional to the difference of concentrations, and inversely proportional to the distance of the elements from one another”.

Going along this analogy, he assumed that the flux of matter is proportional to its concentration gradient with a proportionality factor  $k$ , which he called “a constant dependent upon the nature of the substances”.

Following Graham set-up, Fick considers in a vertical vessel – translating this model in terms of differentials – a layer of concentration  $y$  defined by two horizontal planes  $x$  and  $x+dx$ , and he writes the quantity of solvent diffusing during  $dt$  in the adjacent layer ( $x+dx$ ,  $x+2dx$ ), in which the concentration is  $y + (dy/dx)dx$ , as:

$$- Q k (dy/dx)dt,$$

where  $Q$  is the area through which diffusion occurs. According to Fick, “ $k$  is a constant dependent upon the nature of the substances”. Surprisingly, Fick was describing a flux – a new concept created by Fourier as the basis of his theory of heat diffusion – without using this word.

The fundamental law of diffusion is then given by the differential equation (the so-called second Fick equation) which he derived “according to the model of Fourier’s mathematical development” [8]:

$$\frac{\delta y}{\delta t} = k \left( \frac{\delta^2 y}{\delta x^2} + \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dx} \cdot \frac{\delta y}{\delta x} \right)$$

with the section  $Q$  as a function of the height  $x$ . In the case of a constant section, the equation simplifies to:

$$\frac{\delta y}{\delta t} = k \frac{\delta^2 y}{\delta x^2}$$

following Fick’s notation<sup>4</sup>.

Fick had a lot of difficulties to verify the validity of his equation. Let us point out how his approach is different from Graham’s. Instead of performing experiments on a series of different salts, he only used salt (kitchen salt) solutions, but he varied the geometrical conditions. The second derivative of a concentration versus distance is not an easy quantity to measure with the required accuracy. However, he was successful in performing a series of experiments under a stationary regime in two series of experiments. Fick considered only *stationary states*. With  $dy/dt=0$ , the fundamental equation simplifies. Fick gave the solution in two cases corresponding to his experiments. First for a cylinder ( $Q$  constant):

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = 0$$

whose solution is linear:  $y = ax+b$ . In the case of a cone (in his experiment Fick used a funnel) whose section is proportional to  $x^2$  the fundamental equation becomes:

<sup>3</sup> Joseph Fourier , *Théorie analytique de la Chaleur*, 1822 ; Georg Simon Ohm, *Die Galvanische Kette mathematisch bearbeitet*, 1827.

<sup>4</sup> Actually a minus sign is present on the right hand side in the German original paper as well as in the further English one. Such a sign will give unstable solutions, as it is well known by metallurgists for the spinodal decomposition. This obvious “error” was not a source of difficulty for Fick. Because of the available experimental conditions, he made his measurements and the subsequent analysis only in the case of stationary states.

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{dy}{dx} = 0$$

whose solution is easily found:  $y+a = -(c/x)$ .

In Fick's experiments the bottom of his tubes was in both cases in close contact with the salt in order to maintain at this level a saturated solution, while the top was in contact with a large reservoir of pure water. The concentration versus depth was measured thanks to a small bulb immersed in the solution and hanging to the arm of a balance, which allows the measurement of the "specific gravity" (i.e. the density).

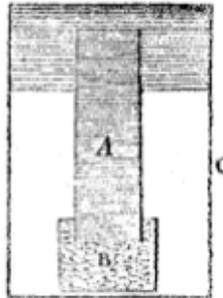


Fig.1: Experimental set-up, after Fick [9]. At the bottom, B is a reservoir of saturated salt solution, C a big vessel full of pure water, and the salt gradient is created in the cylindrical tube A.

It is sometimes difficult to understand all the details, because the author did not provide any drawing, nor any graph, just one table of results for both cases. However, there are more details about the experimental set-up in the third paper <sup>5</sup> [9] (fig.1)

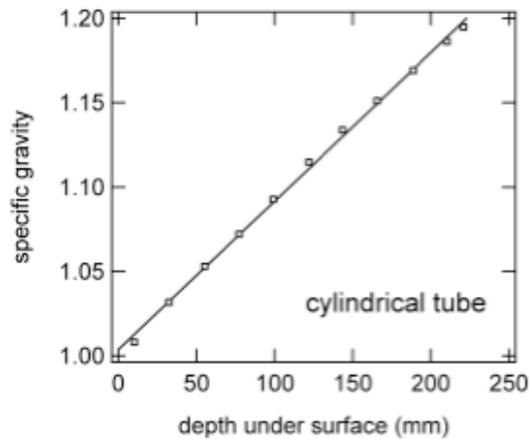


Figure 2: From Fick's tables (cylindrical tube) [6]

<sup>5</sup> Fick published three papers on diffusion in 1855 [6,9] and, according to [5], a fourth one two years later [10].

I could easily plot the results of the cylindrical tube, which gives a nice straight line (fig. 2) as predicted from his equation. For the funnel, it is not so easy, as Fick gave the distance as depths from the top, while the distance  $x$  in the solution was measured from the apex of the cone! I assumed the funnel set with the larger area at the top, but I had to guess the virtual position of the apex. Assuming the cone apex lying 250 mm below the upper surface (which Fick chose as the origin of distances), I obtained a nice verification of the expected relation (fig. 3) in spite of the fact the saturation was not attained, so that the stationary state remains doubtful in this case <sup>6</sup>.

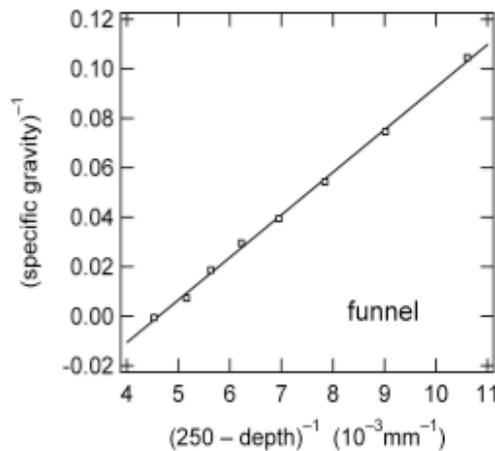


Figure 3: From Fick's table [6], assuming that the apex of the funnel was 250 mm below the upper surface

The results of these experiments (apparently a rather small number according to the few data given in the article, for a unique system (salt dissolved at saturation in water) made Fick confident in the validity of his equation for any combination of bodies. So he decided to determine the "diffusibility"<sup>7</sup>  $k$  of salt in water. He proceeded with three cylindrical tubes of different lengths, and measured, when the stationary state was realised, the amounts of salt which in a given time diffused out of the upper section of the tube and diffused during the same time through any section of the tube according to the assumption of a stationary state. This quantity  $M$  is inversely proportional to the length, so that by multiplying this quantity by the time and dividing it by the tube lengths, the same value must be obtained for the three tubes, from which  $k$  (our  $D$ ) is determined.

$$ML/t = JL = k C_S$$

I suppose Fick assumed the concentration of salt was zero at the top and equal to the saturation value  $C_S$  at the bottom of the tubes.

In a unique table, Fick gave a series of results at different temperatures between 15 and 22°C. The agreement between the three tubes was fine (better than 10%). The values are of the order of 11 mm<sup>2</sup> per day, i.e.  $1.2 \cdot 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s. Fick points out that  $k$  increases with increasing

<sup>6</sup> A very careful analysis of Fick's experiments has been carried out by T.W. Patzak [11].

<sup>7</sup> This word was probably coined by analogy with "conductibility" created by Fourier.

temperature, as already expected from Graham's experiments. But according to his comments, "this dependence upon temperature is not a simple one".

Actually Fick's theory did not lie on very strong basis, neither theoretical nor experimental. This weakness explains the criticisms it received. According to the chemist Fr. Beilstein (cited by [5]) the flux of diffusion could as well be proportional to the square root of the difference of concentration between two adjacent layers. In a last paper [10] Fick argued that in such a case a stationary state should not be possible. Actually this state lies at the basis of Fourier's model: assuming a "permanent" regime of heat flow, Fourier shows that the temperature does vary linearly with distance in a rod and that the expression of the flux is a quantity equal in any section of the rod, which *ipso facto* is proportional to the gradient of temperature [12].

Another criticism was related to the implicit assumption that  $k$  is independent of the concentration and of its gradient. This remains an actual problem, and we now know a number of cases where these two assumptions are not valid. However, one usually prefers to keep the diffusion equation in its primitive form with a variable  $D$ , this dependence being understood in the frame of theoretical models.

At that time, diffusion measurements by Graham and Fick were confined to fluids, because such measurements were possible at temperatures around room temperature. Apparently diffusion in solids was not a subject of concern to scientists, because such a process was not credible, as, for instance, acknowledged by such famous scholars as Lavoisier or Gay-Lussac. This belief was founded on a common opinion among chemists, according to the well known old adage: "*corpora non agunt nisi soluta*". According to common sense, if diffusion in fluids appears as a quite "natural" process, in solids on the contrary it could seem exceptional, if not impossible. However, solid state diffusion was active in many technical processes which should have been well known from scientists of that time<sup>8</sup>. Not only technical processes, but also some experiments could have been seen as a signature of diffusion. But most of the reported experiments in these old papers are rather obscure for a modern reader. Perhaps Robert Boyle (1627-1691) was, according to [13], the author of the first experimental demonstration of solid state diffusion in a series of experiments on "the Porosity of Bodies". He observed the penetration of a "solid and heavy body" (probably zinc) in a farthing (a small copper coin), so that this side took a golden colour, while the other side kept its original one. Boyle was a wise experimentalist: he explained in his essay: "To convince the scrupulous, that the pigment really did sink... and did not merely colour the superficies, ... By filing off a wide gap from the edge of the coin towards, it plainly appeared that the golden colour had penetrated a pretty way beneath the surface of the farthing" (quotation from [13]). Boyle successfully synthesized brass by means of interdiffusion!

Other experiments were quite demonstrative, for instance "diffusion welding" between two pieces of two metals pressed against each other (Walthère Spring, a Belgian chemist, 1894) [13b]. Carbon diffusion in iron was measured in 1881 by Albert Colson [13c] who claims: "a given temperature corresponds to a constant coefficient of diffusion of carbon in iron". Colson underlined the deep analogy of solid/solid diffusion with the liquid/liquid one. He also prepared platinum silicides by solid interdiffusion.

#### IV - W.C. ROBERTS-AUSTEN

In the second part of the nineteenth century, metallurgical studies on steels opened the way to the investigation of diffusion in metals. But quantitative measurements were not performed before the very last years of the nineteenth century, thanks to William Chandler Roberts-Austen (1843-1905), a well-known British metallurgist celebrated for his study of the phase diagram

---

<sup>8</sup> A review of processes and experiments involving solid state diffusion is given by Roberts-Austen in the introduction of his paper [14, part II].

Fe-C (one of the main steel component has been named 'austenite'). The excellent micrographs of specimens of carburised iron, due to his French friend Floris Osmond (1849-1912), clearly showed the penetration of carbon inside the bulk of iron.

The interest of Roberts-Austen in diffusion is not a surprise, as he began as an assistant of Thomas Graham and later on succeeded him as Master of the Mint in London. When he was 'chemist and essayer' in this institution, he had at his disposal good analytical tools, useful to investigate systems based on precious metals. The limitations were essentially the range of temperatures he could manage, but he was lucky since the Pt/RhPt thermocouple was just invented at that time by the French physico-chemist Henry LeChatelier (1850-1936).

Stationary states are not the most common ones, except for the permeation of gases. The large majority of experiments correspond to time dependent processes, such as the interdiffusion between two bodies, liquids or solids. This was the case in the remarkable series of experiments Roberts-Austen carried out in liquid (and solid) metals. As underlined by this author [14] "the difficulty was obvious" (specially in the case of liquids because of convection movements), "but my long connection with Graham's research made it almost a duty to attempt to extend his work on liquid diffusion to metals" – in spite of Ostwald's warning : "To make accurate experiments on diffusion is one of the most difficult problem in physics". Roberts-Austen's analysis of his measurements is based on Fick's law: "It appears probable that the law of diffusion of salts, framed by Fick, would also apply to the diffusion of one metal with another". The diffusion equation (the now so-called second Fick's equation) is expressed by Roberts-Austen according to Lord Kelvin: "The rate of augmentation of the "quality" per unit of time, is equal to the diffusivity multiplied by the rate of augmentation per unit of space of the rate of augmentation per unit of space of the "quality". Here, "quality" means the concentration of the matter which had diffused. And Roberts-Austen writes this long sentence<sup>9</sup> in a shorter formula:

$$\frac{dv}{dt} = k \frac{d^2v}{dx^2}$$

for one dimensional diffusion. It follows that the diffusion coefficient  $k$  may be expressed in square centimetres per day (or per second). Roberts-Austen performed experiments on the diffusion of precious metals (Au, Pt, Rh) in liquid lead, of Au and Ag in liquid tin, and Au in liquid bismuth [14]. The specimens were cut in thin sections which were analysed by weight measurements (with a balance of maximum load 0.5 g and a sensitivity of 2 µg). Finally he made an attempt of solid interdiffusion, gold into lead [14]. On the basis of 6 or 7 sections of the lead substrate, he analysed the diffusion profiles after heat treatments at 4 different temperatures.

To determine  $k$  from the diffusion profiles (concentration versus distance), Roberts-Austen used the tables calculated by J. Stefan<sup>10</sup> for the diffusion of salts, formerly studied by Graham. Stefan (1835-1893) [15] gave the solution of the diffusion equation in two forms: either as a trigonometric series or as the complementary error function  $\operatorname{erfc}(h/2\sqrt{kt})$ . In the case of specimens of finite length, Stefan recommended to apply the principle of reflection plus superposition<sup>11</sup>. Thanks to these analytical solutions, he calculated a set of numerical tables giving the concentration profiles for tubes, with  $h/2(k t)^{1/2}$  as a parameter, where  $h$  is the

<sup>9</sup> The way to tell in words the second derivative was rather heavy...

<sup>10</sup> Josef Stefan (1815-1893), an Austrian theoretician physicist is well known for his expression of the emission power of a black body as being proportional to the fourth power of temperature ( Stefan-Boltzmann law). His contributions to transport phenomena in fluids were of great importance in the context illustrated by Maxwell, Nernst, etc [16]. In his celebrated 1867 paper " On the Dynamical Theory of Gases" , Maxwell gave a theoretical derivation of the diffusion equation, written in terms of gas pressure [17].

<sup>11</sup> The concentration profile is first calculated for a semi-infinite medium, and that part of the curve which lies beyond the surface is reflected through this interface and added to the inside part of the curve.

thickness of the successive layers defined for chemical analysis through the diffusion zone. Roberts-Austen used these tables to analyse his results [14].

Roberts-Austen's results on solid systems are quite comparable to modern tracer measurements, with a right value of the activation energy, if the lower temperature coefficient is discarded. Roberts-Austen was specially lucky in choosing for his investigations the system Au/Pb, since it is now known that gold is a "fast" diffuser in lead - an imperative condition for measurements with the space resolution he could manage in his experiments.

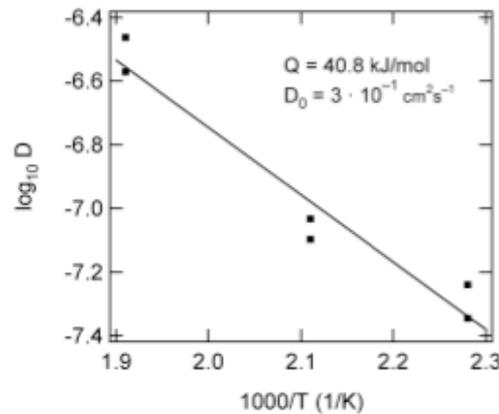


Fig 4: Roberts-Austin data Au/Pb [14]

The Arrhenius graph (figure 4) is not Roberts-Austen's, it is mine. Apparently, he did not discuss the temperature dependence of the coefficient of diffusion in his "Bakerian Lecture" on the *Diffusion in Metals* published in 1896 [14]. The Arrhenius graph, so familiar to everybody with its pervasive use – and abuses – is based on the Arrhenius equation, that Svante Arrhenius (1859-1927) proposed in his 1889 paper [18] – in the course of his investigations on the reaction rate of cane sugar (i.e. saccharose) inversion by means of polarised light rotation – to describe quantitatively his experimental results as well as a collection of published temperature dependences of several chemical reaction rates. This proposal was completed by a theoretical assumption on the "active" state of the concerned substances, an assumption which allowed him to derive theoretically the temperature dependence of the reaction rates. It came as a surprise to me, when I found that the  $\exp(-Q/RT)$  variation with temperature of the coefficient of diffusion was only invoked 30 years later (1922-1923) by Saul Dushman and Irving Langmuir (1881-1957) [19] and independently by H. Braune (1924) [20] and that Langmuir considered this  $T$ -dependence as an empirical relation, without mentioning Arrhenius name!

It is worth to mention here another important contribution by Josef Stefan in the case of multiphase diffusion, when the interface between two contiguous phases is moving with time (as the square root of time as derived by Stefan). Stefan actually was working on the formation of ice under a thermal gradient [21]. As the heat and diffusion equations are identical, Stefan conditions at the interface are now classical: the latent heat (or the solute difference) is balanced by the gradient of heat (or of solute concentration).

Let me conclude this paragraph with a quotation from Roberts-Austen [14]: "The evidence gathered by the metallurgist of active atomic movement in fluid and solid metals may sustain the hope of the physiologist that he will ultimately be able to measure the atomic movements upon

which vitality and thought depend". This audacious sentence should take us back to Adolph Fick, a physiologist. Is life and consciousness purely a matter of chemistry? I leave it to the reader to choose!

#### V - ALBERT EINSTEIN

If you decide to teach basic diffusion, there are two ways to begin with either a phenomenological approach starting with Fick's laws and their mathematical solutions, or a physical and atomistic one, by considering the "random walk" of the diffusing particles. While this last approach was rather straightforward in gases thanks to Maxwell's kinetic theory of gases, the first one follows the historical development of diffusion studies in solid materials under a gradient of chemical potential as in Roberts-Austen experiments. People began to be concerned with an atomic scale approach first of all with the electrical conductivity of ionic crystals, and later with the Kirkendall effect which was observed in several interdiffusion systems. As diffusion processes depend on atom (ion) jumps whose occurrence is dictated by atomic defects (vacancies or interstitials), a description based on atom movements became compulsory<sup>12</sup>.

The never-ending movement of particles in suspension in a fluid was discovered by a Scottish botanist, Robert Brown (1773-1858), who was observing with his microscope the "swarming" motion in the fluid of small particles extracted from living pollen grains<sup>13</sup>. He noticed that this motion was quite general in fresh pollen grains, as well as in dried ones. Brown's experiments with organic and inorganic substances, reduced to a fine powder and suspended in water, revealed such motion to be a general property of matter in this state. He published these results in a paper "A brief Account of Microscopic Observations" in 1828 [22]. The name "*Brownian motion*" has been coined in honour of Brown to qualify the *random walk* of microscopic particles in suspension in a fluid. This was probably one of the origins of Maxwell's kinetic theory of gases. It is pleasant to describe it in popular books (e.g. George Gamow's renowned book [23]) as the wanderings of a "drunk sailor" (fig. 5)!



Figure 5: Random walk according to Gamow [23]

A careful investigation of Brownian motion was performed by Georges Gouy (1854-1926) [24] in a series of experiments with different kinds of particles in different kinds of fluids. He could demonstrate that this motion is independent of external forces (such as vibrations, light, magnetism, temperature gradient) and is more intense in less viscous fluids. Let us quote his

<sup>12</sup> For a history of the Kirkendall effect, see [41].

<sup>13</sup> Brown was interested in the fecundation process of plants.

conclusion: “Brownian motion, unique among physical processes, makes visible the constant state of internal restlessness of bodies, in the absence of any external cause.... It is a weakened and remote testimony of thermal molecular motions”.

The mathematical form of Brownian motion was derived a little bit later (in 1905) by Albert Einstein (1879-1955)<sup>14</sup> [25]. He was the first to understand, contrarily to many scientists of his time, that the basic quantity was not the average velocity of the particles, but their mean square displacement in a given time  $\langle R^2(t) \rangle$ . Trajectories are such (see fig.3) that velocity is meaningless.

Investigations on the Brownian movement was the subject of five papers by Einstein (1905-1908)<sup>15</sup>. Einstein – at that time employed as an engineer at the Patent Office in Bern – got interested in the motion of small particles suspended in a liquid, as a “visible” testimony of the molecular kinetic theory of heat. At that time “atomic theory” was still an object of controversies: in 1895 the famous physico-chemist Wilhelm Ostwald (1853-1932) published an article<sup>16</sup>: “La déroute de l’atomisme contemporain”. Several other papers due to famous scientists of this time were discussing these topics (e.g. is Brownian motion violating Carnot principle?). These discussions will deserve a special paper.

Einstein was studying the fluctuations of a thermodynamical system, which on the basis of the Boltzmann relation for entropy, could allow the experimental determination of the Boltzmann constant  $k$  and therefore of the Avogadro constant. Some discussion of the black body radiation convinced Einstein of this possibility and, with his doctor thesis, he became interested in suspensions of particles in a fluid, which should give a “zoom” image of molecular movements. The “magic” idea was to apply the laws of solute molecules to bigger particles in suspension in a liquid. Einstein’s derivation is probably not a model of rigor: as a main assumption he balances the osmotic pressure due to solutes by the drag force due to the solvent viscosity. Whence for the steady state the relation for the diffusivity of solute molecules and, by extension, of suspended particles is:

$$D = \frac{RT}{N} \frac{1}{6\pi\eta\rho} \quad (1)$$

Here  $R$  and  $N$  are, respectively, the ideal gas constant and the Avogadro constant,  $\eta$  and  $\rho$  the solvent viscosity and the particle radius.

In a second step Einstein describes the successive positions of a particle at time intervals  $\tau$ , assuming that its movement is independent of the movement of all other articles and that  $\tau$  is sufficiently small, but such that the movements of a single particle in two consecutive intervals of time  $\tau$  can be considered as mutually independent. We here identify the two basic assumptions of the “Brownian motion”. Assuming that the displacement  $\Delta$  of particles in a given time along a given direction obeys a symmetrical distribution function  $f(\Delta)$  (actually a Gaussian, for sufficiently long times, as it is easily derived without new assumptions), Einstein

<sup>14</sup> According to the title of his paper “On the movement of small particles suspended in a stationary liquid...” Einstein was not aware of the details of the “Brownian motion” He explains: “It is probable that the movements to be discussed here are identical to the so-called “Brownian molecular motion”. However the information available to me regarding the latter is so lacking in precision, that I can form no judgment in the matter”. After the publication of his paper, several scientists, specially Georges Gouy, informed him of their experimental observations of the Brownian motion, as he explains in the introduction of his second paper “On the theory of Brownian motion” published the next year.

<sup>15</sup> The 1905 paper is the most cited in the literature among the famous papers Einstein published in 1905.

<sup>16</sup> Ostwald’s speech “Die Überwindung des wissenschaftlichen Materialismus” was delivered in Lübeck, published in 1895, and shortly after translated in French (Revue générale des sciences pures et appliquées (15 Nov. 1895) pp.952-958 (O. Hardouin Duparc, private communication).

derives an equation for the space distribution of the particles that is just the second Fick's law, with the diffusivity defined on a microscopic basis:

$$D = \frac{1}{2\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 f(\Delta) d\Delta = \frac{1}{2\tau} \langle \Delta^2 \rangle. \quad (2)$$

The mean displacement  $\langle R(t) \rangle$  of a large number of particles is nil in the case of a truly random walk, in the absence of external "forces". So it is the mean square which is the meaningful quantity. The fundamental relation above links a macroscopic quantity, i.e. the coefficient of diffusion, and a microscopic one, the mean square displacement. We can rewrite it in 3-D as:

$$D = \langle R^2 \rangle / 6t. \quad (3)$$

Eliminating the coefficient of diffusion between equations (2) and (3), Einstein obtains a relation for the "mean displacement" in a time  $t$ :  $L = \sqrt{2Dt}$ , which should allow the experimental determination of Avogadro's constant. A simple numerical calculation convinced Einstein that the order of magnitude should make the experimental verification quite possible.

Relation (3) is frequently quoted as Einstein-Smoluchowski relation, as this last author published independently a year later a theory of the Brownian motion, based on a kinetic approach of the interactions and collisions between particles – quite different from the thermodynamic approach of Einstein [26]<sup>17</sup>. M. Smoluchowski (1872-1917) claims his "method allows a better understanding of the intimate mechanism of the phenomenon" – actually a true assertion! Nevertheless, Einstein was finally obliged to look at the details of the kinetics in order to derive the dependence of the viscosity on the volume fraction of particles.

This first paper was followed a few months later by a more theoretical one, where Einstein studied not only the translational movement of suspended particles, but also the rotational one of spherical particles. Let us just quote the first lines of this paper: "Soon after the appearance of my paper on the movement of particles suspended in liquids, demanded by the theory of heat, Siedentopf ... informed me that he and other physicists – in the first instance Prof. Gouy (from Lyon) – had been convinced by direct observations that the so-called *Brownian motion* is caused by the irregular thermal movements of the molecules of the liquid" [25].

Later on (1908) Einstein published "a simple theory of this phenomenon" (Brownian motion), which "would be welcomed by ... chemists"! In this paper, Einstein proposed, thanks to "simplified assumptions", a straightforward derivation of his equation, the one which was later given in most elementary textbooks<sup>18</sup>.

I shall mention the very elegant approach due to Paul Langevin (1872-1946) [32], which as he claimed is more direct than Einstein's and simpler than Smoluchowski's. He describes the motion of free (i.e. in the absence of external force) particles of mass  $m$  in the  $x$  direction, on the basis of the law of dynamics, with two force terms: a viscous resistance according to Stokes formula plus a fluctuating force  $F(t)$  independent of the velocity, which results from the molecular impacts on the Brownian particles, such that its time average  $\langle F(t) \rangle = 0$ :

$$m (dv/dt) = -6 \pi \eta \rho v + F(t).$$

<sup>17</sup> Smoluchowski arrived at the same formula as Einstein (eq. 1 and 4), with a numerical factor larger by  $\sqrt{64/27}$ . Following Smoluchowski's approach, Langevin [32] arrived at the Einstein formula without this factor. Moreover experimental results did not confirm this factor.

<sup>18</sup> The five Einstein papers on Brownian movement have been published in an English translation with several notes and comments in a book [25].

By integration and taking the time average [with  $(1/2) m\langle v^2 \rangle = (1/2)k_B T$ ], he ends up with:

$$\langle X^2(t) \rangle = (RT/N) (1/3\pi\eta\rho) t, \quad (4)$$

i.e. exactly Einstein's formula for the steady state regime, which is realized after a very short time  $M/6\pi\eta\rho$ . For shorter times, i.e. between two impacts, the motion would become ballistic with  $\langle X^2 \rangle \sim t^2$ . Actually this time can be longer because of a kind of memory effect in the exchange of momentum between the molecules and the impacted particle.

It was the privilege of Jean Perrin (1870-1942) to fully exploit Einstein's theory, probably – I guess – following a suggestion of Langevin, definitively establishing the reality of atoms and molecules, a work for which he was granted the Nobel Prize in 1926<sup>19</sup>. In a series of clever experiments, Jean Perrin and his students Chaudesaigues, Dabrowski, Bjerrum, Costantin [29] could verify Einstein's relations, beautifully described in two chapters of his book "Les Atomes" [29], published in 1913, a book whose reading can still be warmly recommended. Perrin experiments just require a microscope, and a suspension in a liquid of small spherical particles (a few tenths of micron in diameter). From the observation of the distribution of particles in a vertical tube, J. Perrin concluded that "an emulsion is an atmosphere in miniature", which verifies Einstein's assumption.

To check the Einstein-Smoluchowski formula, you just have to observe under the microscope the motion of a given particle and to mark its positions at regular time intervals. Jean Perrin describes enthusiastically "*le prodigieux enchevêtrement de la trajectoire réelle*" (fig. 6), "the prodigious entanglement of the real trajectory". If we could plot the particle positions at time intervals hundred times smaller, every linear segment of the trajectory would take a polygonal shape as complicated as the whole trajectory, and so forth... We can see how in such a case the notion of a tangent to a trajectory vanishes". What a premonitory description of a fractal line, fifty years before Benoit Mandelbrot's work [30]!

Jean Perrin checked that the particle displacements did exactly follow random laws. In two dimensions, i.e. in the plane of the observations under the microscope, the values of  $R(t)$  are distributed according to a Gaussian law with a well-defined standard deviation around the square root of  $\langle R^2(t) \rangle$  (fig. 6). According to J. Perrin again, "the randomness of the particle motion is definitely established".

In the same series of experiments, easy to reproduce with a simple experimental set-up, Jean Perrin succeeded in obtaining a quite remarkable result: the measurement of Avogadro's constant according to another relation given in Einstein's first paper (eq.4). The result, with  $N$  being some  $10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , is quite remarkable as it is an *absolute* determination, thanks to so simple an experimental tool – so far from our modern and sophisticated investigation machines! These simple experiments bore the definite proof of the existence of atoms against ambient scepticism. Let us quote Einstein:

"The agreement of these considerations with experience together with Planck's determination of the true molecular size from the law of radiation (for high temperatures) convinced the sceptics, who were quite numerous at that time (W.Ostwald, E.Mach, ...) of the reality of atoms. The antipathy of these scholars towards atomic theory can indubitably be traced back to their positivistic philosophical attitude. This is an interesting example of the fact that even scholars of audacious spirit and fine instinct can be obstructed in the interpretation of facts by philosophical prejudices." [31].

<sup>19</sup> A biography of Jean Perrin is available in English: Marie Jo Nye: "*Molecular Reality: a Perspective on the Scientific Work of Jean Perrin*" (McDonald, London, 1972).

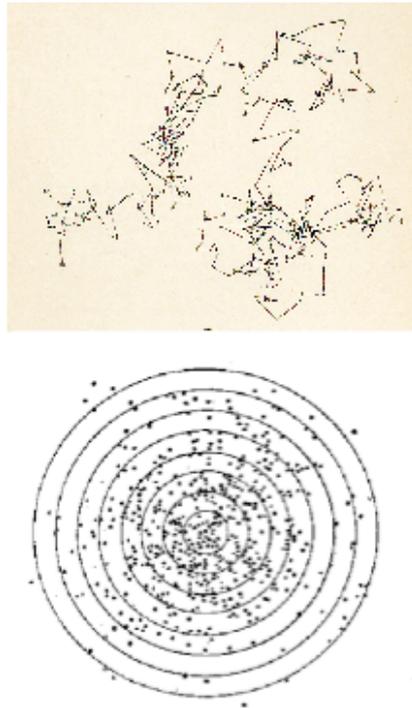


Fig. 6: Brownian motion, after Jean Perrin [29]: (above) an example of a trajectory and (below) statistical distribution of displacements (the circles correspond to fractions and multiples of the square root of the mean square displacement  $\langle R^2(t) \rangle$ ).

Let us come back to Einstein's papers. Unknowingly, Einstein was answering a question expressed the same year (1905) by the genetician-statistician Karl Pearson (1857-1936) in a letter published in *Nature*, entitled "The problem of the Random Walk" – a question arising perhaps from the contagion due to mosquitoes [27]:

"Can any of your readers refer me to a work wherein I should find a solution of the following problem, or failing the knowledge of any existing solution, provide me with an original one? ...A man starts from the point O and walks  $z$  yards in a straight line, he then turns to any angle whatever and walks another  $x$  yards in a second straight line. He repeats this process  $n$  times. Inquire the probability that after  $n$  stretches he is at a distance between  $r$  and  $r + \delta r$  from his starting point O." Pearson's thought trajectory is perfectly illustrated by Jean Perrin's ones (fig. 6). The expression "random walk" was probably coined at that time, from the exact words Pearson used.

Quite remarkably, the answer had been given five years before, by the young French mathematician Louis Bachelier (1870-1946) in his doctor dissertation [28]. But concerns of Bachelier were very far from Pearson's; in his thesis entitled "Théorie de la Spéculation", he was studying the fluctuations of stock-market prices as they vary up and/or down. Let us just translate the daily quotations in particle positions at equal time intervals: we are faced with a series of random numbers. Applying the central limit theorem, Bachelier describes these values through a Gaussian dispersion law. Calculating the probability  $P$  that the price be equal or larger

than a given value on a given day, he showed that  $P$  obeys Fourier equation. He describes the elementary process as a law of *diffusion of probability*. As a fine mathematician, the second part of his derivation relates to the limit case where the variable is a continuous one and still obeys the same equation<sup>20</sup>. Later on this first model received considerable developments, as random walk is just the sum of random variables. A famous theorem on random walks on an integer lattice was derived in 1921 by G. Pólya (1887-1985)<sup>21</sup> – a renowned mathematician who coined the name of the “central limit theorem” – giving a strong basis to the classical model.

But let us remember that the movement of material particles in suspension in a liquid were the starting point of our speculations. It is interesting at this stage to mention some later developments of the theory of the random walk. Starting with the *stricto sensu* Brownian motion of a particle in suspension in a fluid, people got interested in the random walk of ... anything. For mathematicians the expression “Brownian motion” is rather devoted to a mathematical object defined by extrapolation at the zero limit of the space and time increments: the trajectory becomes a “monster curve” with two paradoxical properties: continuous everywhere *and* nowhere derivable in a  $n$ -D space. Let us quote specially the mathematical theory of Norbert Wiener (1926) and the discussion of dispersion functions more realistic than the Gaussian one (Black, Scholes, Merton, 1973) [33].

Physicists, busy in another world, wish to understand the basis of diffusion in solids, i.e. the movement of an atom (ion, molecule) on a lattice or in a disordered network). Just assuming a symmetrical probability distribution function (pdf)  $f(X, \tau)$  of distances  $X$  that a particle walked in a given time  $\tau$ , it easy to derive, as Einstein actually did in his last paper, the relation between the diffusivity  $D$  and  $\langle X^2(\tau) \rangle$  or  $\langle R^2(\tau) \rangle$ , (see eq. 3). Statistical basis of this assumption lies in the central limit theorem, which predicts that the pdf is a Gaussian with a standard deviation equal to  $2\langle X^2 \rangle$  as we underlined above. In crystals the situation is rather simple, since the jump lengths are fixed, randomness is due to jump directions.

Further important developments of random walk models were due to physicists, statisticians and mathematicians. Let us mention the CTRW model (Continuous Time Random Walk) [33b, 34]: in this model the time intervals between two jumps are no more fixed; they instead obey a probability distribution function (pdf). A complete model assumes two pdf's, one for time intervals (or “waiting” times between two consecutive jumps), another one for jump lengths. When these pdf's are Gaussian, Einstein's formula remains valid: the square root of time law is obeyed. Further developments rely on other kinds of pdf's: a power law distribution for time intervals leads to “subdiffusion”, i.e.  $\langle X^2 \rangle \sim t^n$ , with  $n < 1$ . Inversely a power law for lengths can lead to “superdiffusion” (the so called “Lévy flights”, fig.7) with  $n > 1$  [34]; in this case one can define a mean length but not an average, as the pdf does not have an upper limit.

---

<sup>20</sup> To get a doctor degree, it was compulsory to write a small dissertation on another topic proposed by the examination board. Quite remarkably, this “second dissertation” discussed the small translational movements of a solid sphere immersed in a fluid, – a premonitory view [40].

<sup>21</sup> In 1- and 2-D lattices, the probability that the particle will *never* reach any given point is nil. In a 3-D lattice, according to Pólya, this is no more true ( this probability has a finite value).

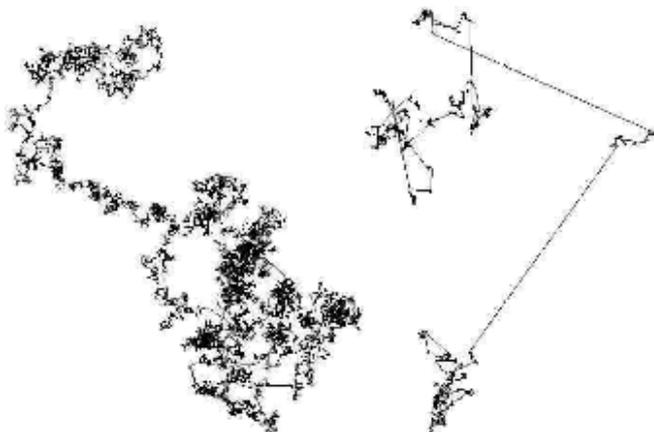


Fig.7: One thousand steps: random (left) and Levy flights (right)

#### VI - ... AND LATER ON

With these strong bases, Fick's and Einstein's equations, the way was open to new experiments in order to determine diffusion coefficients in solids and identify the atomic mechanisms in the frame of theoretical developments, specially in connection with models of random walks and departures from purely random movements (cf. the so-called "correlation factors"). Their study was specially suited for numerical simulations by the Monte-Carlo methods. But this history could be the subject of another paper.

On the other hand there was still the need for better experimental techniques. I would just select two of them, for the sake of limiting the length of this paper: radioactive tracers for self (and hetero-) diffusion, and electron microprobe for interdiffusion.

A critical stage in diffusion measurements was accomplished by György von Hevesy (1885-1966), a Hungarian born and European personage, who worked in several famous places with celebrated scientists such as A. Rutherford, Henry Moseley or Niels Bohr. He was probably the first one to understand the usefulness of radioactive tracers as a tool in physics and chemistry. In 1912, when he was working in Vienna at the Radium Institute, he used radioactive lead as a "radioindicator" – "radiotracer" in modern language – ( $^{210}\text{Pb}$ , also called Radium D,  $^{212}\text{Pb}$  or Thorium B) in several studies, including Pb self-diffusion. Later on, in Vienna, Budapest or Copenhagen, he was using these radiotracers to study diffusion in salts, in liquid and solid lead, and even in vegetables. After the discoveries in 1934 of artificial radioactivity by Irene and Frederic Joliot-Curie and neutron activation by E. Fermi, he prepared several artificial radioelements to study the assimilation of phosphorus by plants or the metabolism of this element in rats. These studies are a little far away from our field, but because of this large range of applications, the Nobel Prize in Chemistry was awarded to Hevesy in 1943. An account of these studies was the object of a book "Radioactive Indicators" he published in 1946 [35]<sup>22</sup>. Radiotracers were largely used after World War in many various ways developed by a lot of scientists in several countries, because this technique allowed very accurate measurements of

<sup>22</sup> Hevesy's works are not limited to radiotracer applications. He was the initiator of chemical analysis by X-ray fluorescence (the subject of a book published in 1932), and with Coster in 1923 he discovered the element hafnium (see also [35b]).

diffusion coefficients in most solids. Their importance is even underlined by their absence or rarity (and high price!) in a few important cases: aluminium, silicon and oxygen, to cite the more important. There was no good remedy to this lack until the mass spectroscopy analysis of stable isotopes (specially oxygen thanks to  $^{18}\text{O}$ ) became available.

Finally, I would like to mention another important tool which appeared in 1950-51, the electron probe microanalyser, built by the French physicist R. Castaing (1921-1998), an instrument in which a very fine beam of electrons excites characteristic X-rays. Chemical analysis on a micron scale was made possible by X-ray emission spectroscopy and showed its powerful applications with the diffusion profile through the multiphase couple Cu/Zn. [36]. A new way of investigating interdiffusion processes became rapidly available to a large number of laboratories thanks to the commercial production of the instrument.

Later on other analytical tools were available allowing new diffusivity measurements [37-39], specially secondary ion emission coupled with mass spectrometry and nuclear methods (NMR, Mössbauer spectroscopy, Rutherford back scattering, ...), but the history of their development lies outside of the scope of the present paper.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

It is my pleasure to thank several colleagues whose documents helped me in preparing this paper, especially J. Dhombres and B. Pourprix whose knowledge of the history of physical and chemical sciences in the nineteenth century is impressive – and Olivier Hardouin Duparc for his continuous interest in my search of ancient literature and a careful reading of the manuscript. I also thank F. d'Heurle for many valuable suggestions – and the organisers of two international Conferences (B.S. Bokstein and B.B. Straumal: Diffusion in Solids, Moscow, May 2005, and J. Kärger and P. Heitjans: Diffusion Fundamentals, Leipzig, September 2005) who invited me to deliver the two lectures which are the basis of the present article.

#### References

- [1] Diffusion Processes, Thomas Graham Symposium, ed. J.N. Sherwood, A.V. Chadwick, W.M. Muir, F.L. Swinton, Gordon and Breach, London, 1971, Vol.1, pp. VI-VII.
- [1b] B. Pourprix, R. Locqueneux, *Fundamenta Scientiae*, 6, N°3, (1985) 179-207
- [2] From E.A. Mason, *ibid*, pp. 3-27.
- [3] M. l'abbé Nollet, *Histoire Académie Royale des Sciences, Math. et Phys.* (1752) 57-104.
- [4] H. Darcy, *Histoire des fontaines publiques de Dijon*, Appendice, note D (1856).
- [5] B. Pourprix, R. Locqueneux, *Fundamenta Scientiae*, 8, N°2 (1967) 147-171.
- [6a] A. Fick, *Poggendorff's Annalen*. 94 (1855) 59-86.
- [6b] A. Fick, *Phil. Mag.* S.4, Vol.10 (1855) 30-39.
- [7] A. Fick, *Pogg. Ann. Phys. Chem.* 91 (1854) 287-290.
- [8] J. Fourier, *Théorie Analytique de la Chaleur*, Firmin-Didot père et fils, Paris, 1822. Facsimile, Ed. Jacques Gabay, Paris 1988.
- [9] A. Fick, *Z. für rat. Medicine* 6, (1855) 288-301.
- [10] A. Fick, *Liebig Ann. Chem.* 102, (1857) 97-101.
- [11] T.W. Patzak, Fick's Diffusion Experiments revisited, unpublished, available at <http://petroleum.berkeley.edu/papers/patzek/Fick%20Revisited%20V2.pdf>
- [12] J. Dhombres, J.B. Robert, Fourier, Créateur de la Physique mathématique, Belin, Paris (1998).
- [13] Cited by L.W. Barr, *Diffusion in Materials*, DIMAT 96, ed. H.Mehrer, Chr. Herzig, N.A. Stolwijk, H. Bracht, Scitec Publications Vol.1, 1997, 1-9.  
See "The Works of Robert Boyle", ed. Michael Hunter and Edward B. Davies, 14 vol. 'The Pickering Masters' series, Puckering and Chatto, London (1999-2000), Vol. 10

- [13b] W. Spring, Bull. Acad. Royale Belgique, 28 (1894) 23.
- [13c] A. Colson, C.R. hebdomadaire Acad. Sciences, 93 (1881) 1074-1076 and 94 (1882) 26-28.
- [14] W.C. Roberts-Austen, Bakerian Lecture on the Diffusion in Metals, Philos. Trans. Royal Soc. London, A187 (1896).  
Part I, Diffusion of molten Metals, pp. 383-403  
Part II, Diffusion of solid Metals, pp. 404-415.
- [15] J. Stefan, Sitzungsberichte Akad. Wien, 81 (1879) 161-214.
- [16] B. Pourprix, R. Locqueneux, Archives Intern. Hist. Sciences 38 (1988) 86-118.
- [17] J. Clerk Maxwell, Phil. Trans. Royal Soc. London 157 (1867) 49-88.
- [18] S. Arrhenius, Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren, Zeit. Phys. Chem, 4 (1889) 226-248
- [19] S. Dushman, I. Langmuir, Phys.Rev 20 (1922) 113 and I. Langmuir, Phys. Rev. 22 (1923) 357-398
- [20] H. Braune, Über Diffusion in Mischkristallen, Phys. Chem. 110 (1924) 147.
- [21] J. Stefan, Annalen der Physik und Chemie, neue Folge, 42 (1891) 269-286.
- [22] R. Brown, Phil. Mag. 4, 161. (1828).
- [23] G. Gamow, *One, Two, Three...Infinity*, The Viking Press, New-York, 1955
- [24] L-G. Gouy, C.R. hebdomadaire Acad. Sciences, CIX, (1889) 102-105.
- [25] A. Einstein, Investigations on the Theory of the Brownian Movement, edited with notes by R. Fürth, Dover publications, New-York, 1956.
- [26a] M. Marie Smoluchowski, Bull. Int. Acad. Sciences Cracovie (1906) 577-602 (in French).
- [26b] M. von Smoluchowski, Annalen der Physik, 4. Folge, 21 (1906) 756-780
- [27] K.Pearson, Nature 72 (27 July 1905), 294
- [28] L. Bachelier, Théorie de la Spéculation, Thèse Ann. Scient. Ecole Norm. Sup., 3<sup>o</sup> série, Tome 17, Gauthier-Villars, Paris, 1900, reprint: Gabay ed, Paris., 1995
- [29] Jean Perrin, Les Atomes, 1<sup>ère</sup> éd Paris (1913), 2<sup>de</sup> éd., Paris, Alcan (1936), reprint (avant-propos de P.-G. de Gennes): Flammarion, Paris, 1991
- [30] B.Mandelbrot, Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman and Company, New York, 1982, pp. 232 ff. ,
- [31] Paul Arthur Schilpp (Ed.), Albert Einstein: Philosopher-Scientist, Cited by E. Nelson, Dynamical Theories of Brownian Motion, Princeton University Press (1967), Second edition [www.math.princeton.edu/~nelson/books.html](http://www.math.princeton.edu/~nelson/books.html)  
see also A. Pais, Subtle is the Lord, the Science and the Life of Albert Einstein, Oxford University Press, Oxford, 1982. French translation: Albert Einstein, la Vie et l'Oeuvre, InterEditions, Paris, 1993
- [32] P. Langevin, C.R.hebdomadaire Acad. Sciences, 146 (1908), 530-533.
- [33] E.W. Montroll, G.H. Weiss, J.Math.Phys. 6 (1965), 167.
- [33b] See also G.H. Weiss , A Primer of Random Walkology, in: Fractals in Science, A. Bunde, S. Havlin (Eds.), Springer, Berlin, 1994, pp.119-161.
- [34] I.M. Sokolov, J.Klafter, A.Blumen, Physics Today, Nov. 2002, 48-54
- [35] G. Hevesy, A Manual of Radioactivity, Oxford University Press, 1938.
- [35b] G. Hevesy, Selected Papers of George Hevesy, Pergamon Press, Oxford, 1967.
- [36] R. Castaing, A. Guinier, Proc. First Europ. Conf. Electron Microscopy, Delft, 1949. M. Nijhof, La Haye, 1950, p. 60
- [37] G.E. Murch, H.K. Birnbaum, J.R. Cost, (Eds.) Nontraditional Methods in Diffusion, The Metallurgical Society of AIME, Warrendale (USA), 1984.
- [38] P. Heitjans, J. Kärger (Eds.), Diffusion in Condensed Matter – Methods, Materials, Models, Springer, Berlin, 2005.
- [39] D. Gupta (Ed.), Diffusion Processes in Advanced Technological Materials, William Andrew, Norwich, NY, 2005.

- [40] Stephen J. Brush, *The Kind of Motion we call Heat*, (1986) Elsevier, Ch. 15, p.671.  
Private communications J.P. Kahane and O. Hardouin Duparc
- [41] H. Nakajima, *J. Metals (TMS)*, June 1997, 15-19.

## NOTES

1 – Fick’s publications have been collected in four volumes : *Gesammelte Schriften* (Würzburg, Stahel’sche VerlagAnstalt, (1903-1904) with an introduction by F. Schenk, an assistant of Fick: Zum Andenken an A. Fick, after [10].

A detailed biography of Fick, written by K.E. Rothsuh, was published in the “Dictionary of Scientific Biography”, Dir. Charles C. Gillispie, Scribners, New-York, 1970-1980.

2 – Ref. [23] gives English translations of five papers

- 1- Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen
- On the movement of small particles suspended in a stationary liquid demanded by the kinetic molecular theory of heat.
- *Annalen der Physik*, 4. Folge, 17 (1905), 549-560
- 2- Zur Theorie der Brownschen Bewegung,
- On the theory of Brownian movement
- *Annalen der Physik*, 19 (1906), 371-381.
- 3- Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen
- A new determination of molecular dimensions
- *Annalen der Physik*, 4. Folge , 19 (1906), 289-306
- Corrections, *ibid.* 34 (1911), 591-592
- 4- Theoretische Bemerkungen über die Brownsche Bewegung,
- Theoretical observations on the Brownian motion
- *Zeit. f. Elektrochemie*, 13 (1907) 41-42
- 5- Elementare Theorie der brownischen Bewegung
- The elementary theory of the Brownian motion
- *Zeit. f. Elektrochemie*, 14 (1908), 235-239.

3 – Original German Einstein and Smoluchowski papers are published in

*Untersuchungen über die Theorie der Brownsche Bewegung .Abhandlung über die Brownsche Bewegung und verwandte Erscheinungen*

Von A. Einstein und M.von Smoluchowski

Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Band 199.

Verlag Harri Deutsch, 1997

– Smoluchowski’s papers were also published in French: *Librairie Académique Perrin*, 3 vol. (1924-1928).

## **ANEXO 3**

### **Transporte de Masa**

**Semestre 2012-1**

**Tarea No. 5**

**Fecha de entrega: 22 de septiembre de 2011**

Lee el artículo “One and a half century of diffusion: Fick, Einstein, Before and Beyond” de J. Philibert, que puedes descargar de AMYD bajo el título “LecturaDifusion2”.

Con base solamente al artículo:

- Dibuja una línea de tiempo de los eventos científicos mencionados en el artículo
- Describe, brevemente, los experimentos realizados por Fick
- ¿Qué ley se desarrolló primero: la ley de Fick o la ley de Fourier ?
- Enlista los campos de interés de los diversos científicos mencionados en el artículo. ¿Le interesaba a Fick la carburización de aceros ?
- ¿Ha sido fácil llegar al nivel de conocimiento que se tiene del fenómeno de difusión en la actualidad?
- ¿Cuánto tiempo se ha requerido para llegar al nivel de conocimiento que se tiene del fenómeno de difusión en la actualidad?

Por favor, envía tus respuestas a

bernie@servidor.unam.mx

**Esta tarea se completará, respondiendo a un cuestionario, el 22 de septiembre en el salón de clase.**

**La tarea completa puede representar hasta 0.75 puntos adicionales para la calificación del 1er examen parcial.**

## ANEXO 4

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE QUÍMICA  
PROGRAMAS DE ESTUDIO SEXTO SEMESTRE**

<b>Asignatura TRANSPORTE DE MASA</b>	<b>Ciclo FUNDAMENTAL DE LA PROFESIÓN</b>	<b>Área INGENIERÍA METALÚRGICA</b>	<b>Departamento INGENIERÍA METALÚRGICA</b>
--	--	--	--

**HORAS/SEMANA**

<b>OBLIGATORIA</b>	<b>CLAVE 1639</b>	<b>TEORÍA 3 h</b>	<b>PRÁCTICA 3 h</b>	<b>CRÉDITOS 9</b>
--------------------	-------------------	-------------------	---------------------	-------------------

<b>Tipo de asignatura:</b>	<b>TEÓRICO-PRÁCTICA</b>
----------------------------	-------------------------

<b>Modalidad de la asignatura:</b>	
------------------------------------	--

**ASIGNATURA PRECEDENTE:** Seriación obligatoria con Introducción a la Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y de Materiales. Seriación indicativa con Transporte de Energía.

**ASIGNATURA SUBSECUENTE:** Seriación obligatoria con Análisis Numérico de Fenómenos de Transporte.

**OBJETIVO(S):**

Conocer y aplicar las leyes fundamentales que describen y explican el transporte de masa para realizar cálculos relacionados con los procesos metalúrgicos y de materiales.

Entender, comprender, explicar, calcular y evaluar los efectos de las variables, de los procesos metalúrgicos y/o de materiales, sobre el transporte de masa involucrado.

Resolver las ecuaciones que describen el transporte de masa en procesos metalúrgicos y de materiales.

**UNIDADES TEMÁTICAS**

<b>NÚMERO DE HORAS POR UNIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>
<b>12T—12P 24 h.</b>	<b>1. INTRODUCCIÓN AL TRANSPORTE DE MASA EN LOS PROCESOS METALÚRGICOS Y DE MATERIALES</b> 1.1. El transporte de masa como parte de los fenómenos de transporte 1.2. Estequiometría y notación del transporte de masa de los procesos metalúrgicos y de materiales 1.3. Conceptos fundamentales del transporte de masa en Ingeniería metalúrgica y de materiales 1.4. Mecanismos participantes y controlantes en los procesos de obtención de metales y manufactura de piezas.
<b>8T—8P 16 h.</b>	<b>2. TRANSPORTE DE MASA EN UNA FASE,</b>

	<b>SINREACCIÓN QUÍMICA</b> <b>2.1. Introducción</b> <b>2.2. 1a Ley de Fick</b> <b>2.3. Ecuación de continuidad para un componente químico</b> <b>2.4. 2a Ley de Fick</b> <b>2.5. Volatilización de zinc en retortas</b> <b>2.6. Separación plomo-zinc</b> <b>2.7. Sinterización difusiva de metales, aleaciones y cerámicos</b> <b>2.8. Carburización de aceros</b> <b>2.9. Formación de sistemas laminados de ferrita-austenita</b>
<b>6T—6P 12 h.</b>	<b>3. TRANSPORTE DE MASA EN UNA FASE, CON REACCIÓN QUÍMICA HOMOGÉNEA</b> <b>3.1. Introducción y determinación de los mecanismos controlantes</b> <b>3.2. Formación de humos en el proceso de humeado de escorias</b> <b>3.3. Crecimiento y disolución de carbonitruros</b>
	<b>3.4. Combustión de gases en el alto horno</b>
<b>8T—8P 16 h.</b>	<b>4. TRANSPORTE DE MASA FLUIDO-FLUIDO, CON Y SIN REACCIÓN QUÍMICA</b> <b>4.1. Introducción y determinación de los mecanismos controlantes</b> <b>4.2. Absorción y eliminación de gases en el acero</b> <b>4.3. Obtención de cobre blister en convertidores</b> <b>4.4. Conversión de arrabio en acero</b> <b>4.5. Escorificación de impurezas del acero</b> <b>4.6. Extracción de metales por disolventes</b>
<b>14T—14P 28 h.</b>	<b>5. TRANSPORTE DE MASA SÓLIDO-FLUIDO, CON Y SIN REACCIÓN QUÍMICA</b> <b>5.1. 5.2.</b> <b>5.3. 5.4. 5.5. 5.6. 5.7. 5.8. 5.9.</b> <b>Introducción y determinación de los mecanismos controlantes</b> <b>Disolución constitucional de ferroaleaciones y aleaciones maestras</b> <b>Tostación de blenda de zinc y otros sulfuros</b> <b>Reducción directa de minerales de hierro</b> <b>Lixiviación de calcina</b> <b>Crecimiento de óxidos</b> <b>Formación de películas sobre metales y cerámicos</b> <b>Ataque de metales a refractarios</b> <b>Infiltración y ataque de metales en cerámicos y de resinas en fibras</b> <b>5.10. Micro y macrosegregación durante la solidificación de aleaciones</b>

**SUMA: 48T – 48P**

### **BIBLIOGRAFÍA BÁSICA**

1. Wilkinson, D. S., *Mass Transport in Solids and Fluids*, Cambridge. England, Cambridge University Press. 2001.
2. Geiger, D.R. and Poirier, G.H., *Transport Phenomena in Materials Processing*, PA. USA, TMS. Warrendale, 1994.
3. Gaskell, D. R., *An Introduction to Transport Phenomena in Materials Engineering*, New York, McGraw-Hill, 1992.
4. Fine, H. A. and Geiger, G. H., *Handbook on Material and Energy Balance Calculations in Metallurgical Processes*, NY, AIME, 1979.
5. Guthrie, R.I.L., *Engineering in Process Metallurgy*, Oxford Science Publications. 1992.

### **BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA**

1. Slattery, J. C., *Advanced Transport Phenomena*, Cambridge. England, Cambridge University Press, 1999.
2. Sohn, H. Y. and Wadsworth, M. E., *Rate Processes of Extractive metallurgy*, NY, Plenum Press. 1979.
3. Coudurier, L. et al., *Fundamentals of Metallurgical Processes*, Oxford, Pergamon Press, 1985.
4. Hayes, P., *Process Selection in Extractive Metallurgy*, Brisbane, Australia, Hayes Pub. Co., 1985.
5. Barrera Godínez, J. A. et al., *Transporte de Masa. Colección de Problemas*, México, Facultad de Química, UNAM, 2002. .

### **SUGERENCIAS DIDÁCTICAS**

Esta asignatura es parte de una serie de cursos, de naturaleza y metodología cuantitativas, que le proporcionarán al estudiante una formación fundamental en la Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Este curso se desarrollará primordialmente mediante la aplicación cuantitativa de los conocimientos de transporte de masa para la solución de problemas clásicos de los procesos convencionales metalúrgicos y de materiales. Mediante esta metodología se buscará la integración del conocimiento de los fenómenos, que ocurren en los procesos Metalúrgicos y de Materiales, con la cuantificación de los mismos. Para facilitar el aprendizaje se propone hacer evidente a los estudiantes la necesidad de

cuantificar el transporte de masa, en los procesos metalúrgicos y/o de materiales, mediante el desarrollo de experiencias de cátedra al inicio de cada unidad. Debe notarse que cada unidad temática incluye horas dedicadas al estudio de los fundamentos

**teóricos y horas para el desarrollo de casos de estudio.**

**FORMA DE EVALUAR**

**La evaluación se realizará mediante la contabilización de la participación en clase, exámenes, ejercicios, proyectos, trabajos y tareas. Se recomienda la realización de un examen por cada unidad. Los exámenes parciales y finales de las materias de la serie de Ingeniería Metalúrgica se elaborarán colegiadamente por los profesores.**

**PERFIL PROFESIOGRÁFICO DE QUIENES PUEDEN IMPARTIR LA ASIGNATURA**

**Es imprescindible que sea un profesor de carrera cuya licenciatura es Ingeniería Metalúrgica con un posgrado en Ingeniería Metalúrgica y/o de Materiales y una amplia experiencia en la modelación matemática de los procesos metalúrgicos y/o de materiales. Esta necesidad surge porque los cursos de "Hidrometalurgia", "Solidificación", "Análisis Numérico en Fenómenos de Transporte", "Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y de Materiales", "Fundición", "Corrosión y Protección" y "Electrometalurgia" dependen fuertemente del conocimiento previo aportado por el curso de transporte de masa hacia el entendimiento de los procesos metalúrgicos y de materiales. Además, los profesores que imparten la serie de materias de Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y de Materiales rotarán, como se hace actualmente, dentro de estos cursos, y por lo tanto esto redobla la necesidad del dominio de la metalurgia y los materiales además del transporte de masa.**