

Universidad Autónoma de Madrid  
Facultad de Ciencias

Trabajo de Fin de Grado

**Estudio estructural y de  
acidez en fase gas**

Sara del Río Plaza

Director: Al Mokhtar Lamsabhi <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Química



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>9</b>
<b>3. Resultados y discusión</b>	<b>13</b>
3.1. Estabilidad de estructuras . . . . .	13
3.2. Acidez en fase gas . . . . .	18
3.2.1. Hidratación específica . . . . .	22
<b>4. Conclusión</b>	<b>25</b>



# Abstract

bla bla bla ingles

En este ensayo se trata la estabilidad estructural de ácidos en fase gas, y la variación de éstos al sustituir un átomo electropositivo (hidrógeno) por uno electronegativo (halógeno) como el flúor y el cloro. El principal tema abordado es el estudio de la acidez intrínseca de una serie de oxácidos y ácidos orgánicos, siendo este apartado de gran interés, ya que la ausencia de interacciones con un disolvente resulta a una acidez muy diferente. Los temas de estudio son las diferencias de acidez de dichos ácidos, los cambios que se producen en la acidez intrínseca con la sustitución de hidrógenos por halógenos y la variación de dicha acidez cuando hidratamos de forma específica el ácido. El aumento de acidez observado al tener átomos más electronegativos en la molécula se ha observado mediante el uso de distintos métodos teóricos. Se han llevado a cabo cálculos DFT con el fin de calcular valores teóricos de la acidez de las moléculas a estudiar, También se ha utilizado el método NBO de análisis de poblaciones para describir los cambios en las configuraciones electrónicas de las moléculas y que son responsables del cambio de la acidez de éstas. Se han empleado cálculos G4 para hacer un análisis más preciso de algunos resultados dudosos con el fin de relacionar los resultados expuestos en el presente trabajo, es importante destacar que dichos resultados expuestos en este trabajo están de acuerdo con los datos experimentales previamente dados.

**Key words:** bla bla bla



# Capítulo 1

## Introducción

Para abordar el tema de la estabilidad y la acidez de los ácidos hay que tener en cuenta la definición ácido-base de Brönsted y de Lewis. [1]

Según Brönsted [2] los ácidos son sustancias que actúan como dadoras de protones y las bases son especies que actúan comoceptoras. En esta definición, el término protón se refiere al ion de hidrógeno  $H^+$ , por lo que un ácido es una especie que contiene al menos un átomo de hidrógeno ácido que puede transferirse como núcleo, un protón, a una especie que actúa como base. La teoría de Brönsted se centra en la transferencia de un protón de una especie a otra, Sin embargo los conceptos de ácidos y bases tienen un significado mucho más amplio que la transferencia de protones. Pueden clasificarse más sustancias como ácidos o bases si se consideran las definiciones desarrolladas por G. N. Lewis [2], el cual dice que un ácido de Lewis es un aceptor de un par de electrones y una base de Lewis es un donante de un par de electrones. Cuando una base de Lewis dona un par de electrones a un ácido de Lewis, ambos forman un enlace covalente coordinado. Un protón ( $H^+$ ) es un aceptor de un par de electrones y, por tanto, un ácido de Lewis, ya que puede aceptar un par solitario de electrones de una base de Lewis. es decir, un ácido de Brönsted es donante de un ácido de Lewis particular, un protón.

En dichas definiciones, ya que no se hace mención a ningún disolvente, se aplica a disolventes no acuosos e incluso a reacciones en fase gaseosa. El comportamiento ácido-base de una sustancia puede variar en gran medida con el disolvente. Por ejemplo, los ácidos fuertes en agua no existen como tal, sólo en su forma disociada y son más fuertes que el catión oxonio, puesto que la donación de protones ocurre desde el ácido al agua, la fortaleza de un ácido fuerte en agua se nivela a la fuerza del ion oxonio y la de cualquier base fuerte a la fuerza del  $OH^-$ . Los ácidos y bases que se encuentren dentro del rango de estabilidad ácido-base en agua son débiles.

---

La acidez de una sustancia en fase gaseosa está relacionada con la energía necesaria para romper heterolíticamente el enlace H-A, esta energía se puede obtener como la suma de la energía necesaria para romper el enlace H-A homolíticamente más la energía necesaria para ionizar H y A (que es la suma del potencial de ionización del hidrógeno y la afinidad electrónica de A). Estos dos procesos son endotérmicos, por lo que la disociación de un ácido no es favorable termodinámicamente en fase gas [1]. En contraste, en disolución acuosa, los iones se hidratan fuertemente, sobretudo el protón por su pequeño tamaño, la energía en dicho proceso es la que explica la disociación de los ácidos en agua.

La cuestión abordada en el presente proyecto es la estabilidad estructural de isómeros y conformeros de diversas estructuras en fase gas, se harán "puzzles" haciendo uso de herramientas computacionales con el fin de determinar la estructura más estable, a medida que avancemos nos irán surgiendo diferentes preguntas; ¿cómo afectan dichos cambios a la acidez de las moléculas?, ¿cómo afectaría a esta propiedad una hidratación en un punto ácido?.

Con ayuda de las componentes termodinámicas de ácidos orgánicos y oxácidos, se hará un estudio riguroso del efecto que produce en la acidez, la sustitución de hidrógenos por halógenos en fase gaseosa, y una hidratación específica en el punto ácido. [5]



# Capítulo 2

## Metodología

La química computacional es una herramienta útil para estudiar los ácidos en fase gas. Es una técnica que hace uso de los fundamentos cuánticos para calcular las estructuras y las propiedades de moléculas en distintos estados. Sus resultados pueden predecir propiedades físico-químicas y es el complemento ideal que se ha revelado imprescindible para acompañar al experimento. Los estudios computacionales pueden llevarse a cabo con el fin de facilitar el trabajo en el laboratorio, ser usados para predecir moléculas hasta la fecha totalmente desconocidas o explotar mecanismos de reacción que no han sido fáciles de estudiar experimentalmente. Así, la química computacional puede ayudar a la experimental a predecir objetos químicos totalmente nuevos y explicar fenómenos experimentales, la idea de las herramientas de simulación es tratar de ir hacia donde las demás técnicas no logran llegar o les cuesta mucho, con la revolución tecnológica hoy en día, se pueden tratar sistemas muy complejos.

La energía total está determinada por una solución aproximada de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo, haciendo uso de la aproximación de Born-Oppenheimer se simplifica dicha ecuación. Esto conduce a la evaluación de la energía total como una suma de energía electrónica en las posiciones fijas del núcleo más la energía de repulsión del mismo. Algunos métodos para determinar la energía total y predecir la estructura molecular de un sistema son, entre otros muchos: HF (hartree Fock), MPx (Moller-Plesset), DFT (teoría del funcional de densidad), etc.

Los métodos ab initio como Hartree-Fock ayudan a resolver la ecuación de Schrödinger asociada al Hamiltoniano molecular, esta resolución es aproximada, conociendo siempre el margen de error de antemano. Estos métodos no incluyen ningún parámetro empírico en sus ecuaciones, éstas vienen directamente de principios teóricos sin incluir datos experimentales, tampoco incluye la correlación electrónica por lo que el error de dichos métodos es considerable.[6]

---

La teoría del funcional de densidad es utilizada para determinar la estructura electrónica molecular, expresan la energía total en términos de densidad total en lugar de la función de onda, en estos cálculos hay un hamiltoniano aproximado y una expresión aproximada para la densidad electrónica total. La calidad de los resultados obtenidos, y su eficiencia computacional hacen que los métodos DFT se utilicen con frecuencia, la precisión de éstos se debe a que se incluye la correlación electrónica, aunque de forma aproximada ya que el funcional no es exacto, se ha probado su eficiencia en muchos sistemas orgánicos e inorgánicos. [4] [6]

Por otro lado los métodos compuestos G1, G2, G3 y G4 proporcionan una mayor precisión en los resultados, puesto que están basados en la teoría del funcional de densidad, combinando también métodos como Hartree-Fock, Moller-Plesset. Todos estos métodos también son preparados para la imaginación de nuevos compuestos.

Para el diseño de la estructura de todos los ácidos a estudiar se ha utilizado Gaussian09 [13], cuyo programa también ha ayudado a resolver los cálculos DFT expuestos en este trabajo, se ha utilizado el funcional B3LYP [3] [4] que es un método híbrido que contiene elementos DFT y la teoría Hartree-Fock, HF se utiliza para expresar la energía de intercambio en la aproximación del potencial de correlación de intercambio en la ecuación de kohn-Sham. Se realizaron optimizaciones de estructura completa utilizando la base 6-311G\*\*, donde ningún compuesto tiene frecuencias imaginarias en la geometría optimizada final. Los datos de energía total Hartree-Fock se calcularon utilizando la base 6-311+G(2df,2p) por su mayor precisión.

Las componentes termodinámicas se calcularon utilizando métodos estándar [7], teniendo en cuenta las energías del punto cero (ZPE) y las correcciones del punto cero y térmicas de la entalpía (TCE) y la energía libre de Gibbs (GFE). Al usar la base mencionada antes (6-311G\*\*), estos números llevan una corrección, las energías escaladas serían las siguientes:

$$H(0K) = E_{HF} + 0,9887 * ZPE$$

$$H(298K) = E_{HF} + TCE + ZPE - 0,9887 * ZPE$$

$$G = E_{HF} + GFE$$

Se consideró la conformación de energía más baja de cada compuesto en el estudio de estabilidad y se han diseñado nuevas estructuras para hacer un análisis más extenso de la acidez en fase gas.

Se realizó un análisis de poblaciones NBO (orbitales de enlace natural), éste se basa en un método para transformar de manera óptima una función de onda en forma localizada, correspondiente a los elementos de un centro (pares solitarios-LP), y de dos centros (enlaces-BD) tal como se observarían en la estructura de Lewis de una molécula.

En dicho análisis, el conjunto de bases orbitales atómicas a la entrada se transforma a través de orbitales atómicos naturales (NAOs) y orbitales híbridos (NHOs) en orbitales de enlace natural (NBOs). Los NBO obtenidos corresponden a la imagen normalmente utilizada de Lewis donde los enlaces de dos centros y los electrones no enlazantes están localizados [8] [9].

En este estudio teórico se utilizó el método desarrollado por Bader, AIM [10], este es un postulado de mecánica cuántica relativo a o que todo lo que puede conocerse respecto a un sistema está contenido en su función de estado  $\Psi$ . El valor de una cantidad física se obtiene de la función de estado mediante la acción del correspondiente operador en  $\Psi$ . De esta forma, a partir de la función de estado, puede obtenerse más información química que simplemente las energías y sus geometrías asociadas. Se localizaron los máximos de densidad de las moléculas con el fin de mostrar el efecto de los halógenos y de la hidratación específica en la acidez.

Se usó el método compuesto G4 para una mayor precisión de resultados, previamente dudosos, con el fin de compararlos con los experimentales. [11]



# Capítulo 3

## Resultados y discusión

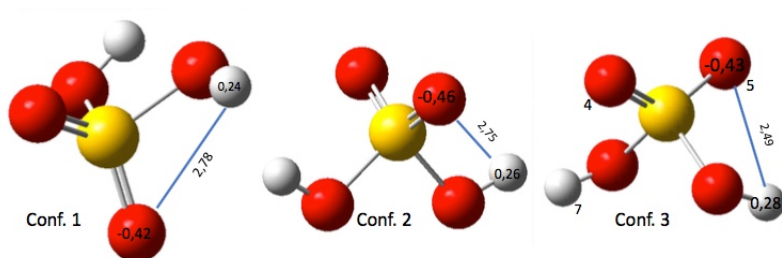
### 3.1. Estabilidad de estructuras

Antes de estudiar la acidez de los compuestos a proponer, se hace un análisis de la estabilidad de sus isómeros y confórmeros con el fin de buscar las estructuras más estables. Se estudiarán los posibles isómeros y confórmeros de los ácidos sulfúrico, carbónico y fosfórico (ANEXO X) con el fin de hallar la estructura más estable en fase gas.

Isómeros $H_2SO_4$	$\Delta E$	Isómeros $H_2CO_3$	$\Delta E$	Isómeros $H_3PO_4$	$\Delta E$
$Conf_1$	4,2	$Conf_1$	0,0	$Conf_1$	1,0
$Conf_2$	2,5	$Conf_2$	1,4	$Conf_2$	0,5
$Conf_3$	0,0	—	—	$Conf_3$	0,0
—	—	—	—	$Conf_4$	0,6

**Tabla 3.1:** Diferencias de la energía libre de Gibbs en Kcal/mol de cada isómero conformacional de los ácidos.

A la vista de los resultados de energías expuestos en la Tabla 3.1, el isómero más estable del ácido sulfúrico es el confórmero 3, debido a que dicha disposición espacial minimiza las repulsiones de los pares de electrones originando una baja energía y a su vez una mayor estabilidad, ésta también se debe a la posible formación de puentes de hidrógeno intramoleculares, ya que los hidrógenos 3 y 7 de dicho confórmero están dirigidos hacia los átomos de oxígeno 5 y 4 respectivamente, con dos pares de electrones libres en orbitales p, la distancia de los H a los O es menor que la suma de sus radios de Van Der Waals, los H presentan una carga positiva y los oxígenos una negativa como se muestra en la figura 3.1.

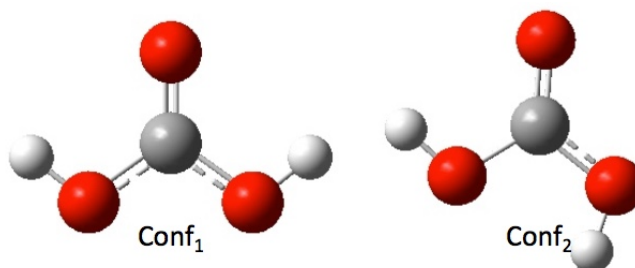


**Figura 3.1:** Parámetros para un enlace de hidrógeno, distancias en Å

Radios de Van Der Waals en Å

$O \rightarrow 1,5$

$H \rightarrow 1,2$



**Figura 3.2:** Confórmeros del  $H_2CO_3$ .

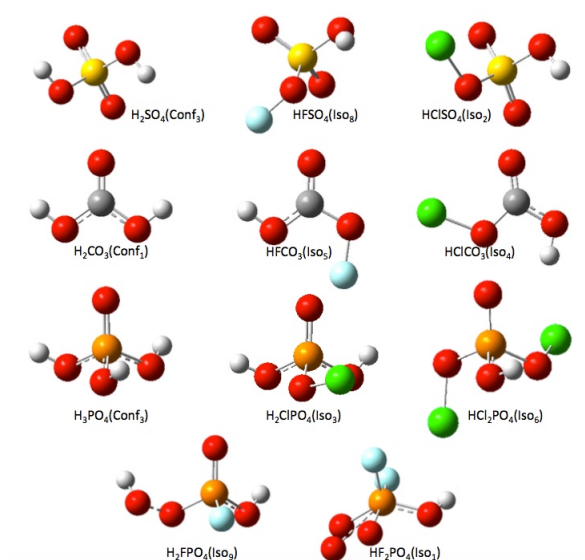
El confórmero del ácido carbónico más estable es el confórmero 1, ver figura 3.2, pero hay que tener en cuenta que la diferencia de energía es mínima, los dos confórmeros presentan una estructura trigonal plana, y un enlace muy fuerte CO. A primera vista, se diría que el confórmero 2 es el más estable debido a a la repulsión electrónica de los pares libres de los dos oxígenos, pero si nos fijamos en la deslocalización electrónica se ve que, los tres enlaces del confórmero 1 son  $\pi$ , ya que hay resonancia entre los oxígenos de los grupos OH y, en el confórmero 2 hay dos enlaces  $\pi$  debido a la resonancia entre un oxígeno del grupo OH y otro del grupo CO, y un enlace  $\sigma$  C-OH, por tanto los enlaces del confórmero 1 son más fuertes y la molécula presenta menor energía total y mayor estabilidad, tabla 3.2.

Confórmeros del $H_2CO_3$	$d(C - OH_{(1)})$	$d(C - OH_{(2)})$
$Conf_1$	1,340	1,340
$Conf_2$	1,360	1,340

**Tabla 3.2:** Distancias C-OH del ácido carbónico

En cuanto a los conformeros del ácido fosfórico, no se puede decir que el conformero 3 sea el más estable ya que las diferencias de energía son demasiado pequeñas, y entra dentro del error que puede tener el método teórico usado. Ver tabla 3.1. Esto es debido a que las cuatro distancias P-O de los conformeros son relativamente altas y no hay posibilidad de formación de enlaces de hidrógeno para ninguna de las estructuras propuestas.

Se estudia también la estabilidad de los isómeros y conformeros de los ácidos anteriores sustituyendo uno o varios átomos de hidrógeno por halógenos. Tablas de la 3.3 a la 3.6. Al sustituir un átomo de hidrógeno por un halógeno la distribución de carga de la molécula se verá afectada, y por tanto, la disposición espacial de los átomos, el halógeno podrá asociarse tanto al átomo central como a uno de los oxígenos. Una de las ideas propuestas derivadas de este estudio de estabilidad, es localizar la estructura más favorable para conseguir evaluar el efecto de la sustitución sobre la acidez. Ver estructuras de todos los isómeros considerados en el ANEXO X.



**Figura 3.3:** Isómeros más estables de los ácidos objeto de estudio.

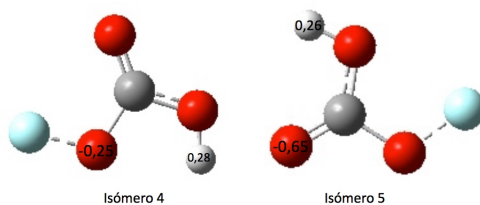
En primer lugar se estudian los isómeros y conformeros del ácido sulfúrico sustituido, donde el isómero 2 del  $HClSO_4$  tiene dos enlace S-O muy fuerte ( $d(S-O)=1,43\text{\AA}$ ) y la disposición del cloro es tal que no hay impedimento estérico ya que está en trans con el hidrógeno. (Ver Fig 3.4  $HClFSO_4(iso_2)$ ). El isómero 8 del  $HFSO_4$  es la molécula más estable (Ver Fig 3.4  $HFSO_4(iso_8)$ ) en la sustitución de un hidrógeno por un átomo de flúor, ya que es la única con dos enlaces S-O muy fuertes ( $d(S-O)=1,43\text{\AA}$ ), además sienten mucha atracción ya que el azufre tiene gran carga natural positiva y los dos oxígenos gran carga negativa ( $S=2,39$  y cada uno de los oxígenos de dicho enlace fuerte  $-0,81$ ).

### 3.1. ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS

Isómeros $HFSO_4$	$\Delta E$	Isómeros $HClSO_4$	$\Delta E$
<i>iso</i> <sub>1</sub>	10,8	<i>iso</i> <sub>1</sub>	0,1
<i>iso</i> <sub>2</sub>	10,8	<i>iso</i> <sub>2</sub>	0,0
<i>iso</i> <sub>3</sub>	10,8	<i>iso</i> <sub>3</sub>	65,0
<i>iso</i> <sub>4</sub>	10,8	<i>iso</i> <sub>4</sub>	64,2
<i>iso</i> <sub>5</sub>	42,7	<i>iso</i> <sub>5</sub>	24,4
<i>iso</i> <sub>6</sub>	10,8	<i>iso</i> <sub>6</sub>	0,1
<i>iso</i> <sub>7</sub>	101,3	<i>iso</i> <sub>7</sub>	110,0
<i>iso</i> <sub>8</sub>	0,0	<i>iso</i> <sub>8</sub>	4,8

**Tabla 3.3:** Diferencias de la energía libre de Gibbs en Kcal/mol de cada isómero conformacional del ácido sulfúrico sustituyendo un H por un halógeno

Los isómeros más estables del ácido carbónico sustituido con halógenos presentan distancias menores de enlaces C-O, dos isómeros de cada compuesto halogenado presentan hibridación  $sp^2$ , es decir, enlaces más fuertes, por ello la diferencia entre los isómeros 4 y 5 es tan pequeña, en el caso del compuesto de flúor la diferencia es de 2 Kcal/mol esto puede ser porque el enlace de hidrógeno que se forma es más débil en el isómero 4, debido a la proximidad del flúor al oxígeno que interviene y por consiguiente, una carga menos negativa de éste. Véase la figura 3.3.



**Figura 3.4:** Isómeros  $HFCO_3$

Isómeros $HFCO_3$	$\Delta E$	Isómeros $HClCO_3$	$\Delta E$
<i>Iso</i> <sub>1</sub>	4,0	<i>Iso</i> <sub>1</sub>	49,9
<i>Iso</i> <sub>2</sub>	3,9	<i>Iso</i> <sub>2</sub>	49,0
<i>Iso</i> <sub>3</sub>	92,7	<i>Iso</i> <sub>3</sub>	92,0
<i>Iso</i> <sub>4</sub>	1,8	<i>Iso</i> <sub>4</sub>	0,0
<i>Iso</i> <sub>5</sub>	0,0	<i>Iso</i> <sub>5</sub>	0,3

**Tabla 3.4:** Diferencias de la energía libre de Gibbs en Kcal/mol de cada isómero conformacional del ácido carbónico sustituyendo un hidrógeno por un halógeno

Análogamente a los casos de los ácidos anteriores se concluye que los compuestos



más estables al sustituir un hidrógeno por un halógeno en el ácido fosfórico son el isómero 9 en el caso del  $H_2FPO_4$  y en el de  $H_2ClPO_4$  el Isómero 3 (Figura 3.4), la estabilidad de éstos se debe a su geometría tetraédrica, hibridación  $sp^3$ , los isómeros restantes con dicha estructura son los que no presentan gran diferencia energética (isómeros 1, 2 y 3 para el compuesto con flúor e isómeros 1, 2, 11 y 12 para el de cloro), no es posible explicar la estabilidad del isómero comparada con éstos ya que tenemos que tener en cuenta el error del cálculo computacional.

Isómeros $H_2FPO_4$	$\Delta E$	Isómeros $H_2ClPO_4$	$\Delta E$
$Iso_1$	1,3	$Iso_1$	0,9
$Iso_2$	1,3	$Iso_2$	0,9
$Iso_3$	0,01	$Iso_3$	0,0
$Iso_4$	8,6	$Iso_4$	40,0
$Iso_5$	8,6	$Iso_5$	40,0
$Iso_6$	56,7	$Iso_6$	29,1
$Iso_7$	8,4	$Iso_7$	40,7
$Iso_8$	8,6	$Iso_8$	43,5
$Iso_9$	0,0	$Iso_9$	30,0
$Iso_{10}$	57,9	$Iso_{10}$	90,2
$Iso_{11}$	22,2	$Iso_{11}$	1,3
$Iso_{12}$	23,2	$Iso_{12}$	0,5

**Tabla 3.5:** Diferencias de la energía libre de Gibbs en Kcal/mol de cada isómero conformacional del ácido fosfórico sustituyendo un hidrógeno por un halógeno.

### 3.2. ACIDEZ EN FASE GAS

Por último, al sustituir un hidrógeno más por otro halógeno las moléculas de mayor estabilidad son el isómero 1 para el  $HF_2PO_4$ , ésto es debido a que es el único isómero que forma un enlace de hidrógeno con el flúor ( $d(H-F)=2,2\text{\AA}$ ), en el caso del  $HCl_2PO_4$  el isómero 6, hay que tener en cuenta que hay dos isómeros más de esta última molécula muy parecidos en energía, son las únicas con geometría tetraédrica, en el caso del isómero 6, no hay tanto impedimento estérico por parte de los átomos de cloro, traduciéndose ésto en una mayor estabilidad de la molécula.

Isómeros $HF_2PO_4$	$\Delta E$	Isómeros $HCl_2PO_4$	$\Delta E$
<i>Iso</i> <sub>1</sub>	0,0	<i>Iso</i> <sub>1</sub>	98,7
<i>Iso</i> <sub>2</sub>	18,0	<i>Iso</i> <sub>2</sub>	38,5
<i>Iso</i> <sub>3</sub>	—	<i>Iso</i> <sub>3</sub>	39,3
<i>Iso</i> <sub>4</sub>	—	<i>Iso</i> <sub>4</sub>	39,3
<i>Iso</i> <sub>5</sub>	—	<i>Iso</i> <sub>5</sub>	38,5
<i>Iso</i> <sub>6</sub>	60,6	<i>Iso</i> <sub>6</sub>	0,0
<i>Iso</i> <sub>7</sub>	60,6	<i>Iso</i> <sub>7</sub>	2,1
<i>Iso</i> <sub>8</sub>	15,9	<i>Iso</i> <sub>8</sub>	19,5
<i>Iso</i> <sub>9</sub>	36,5	<i>Iso</i> <sub>9</sub>	0,1
<i>Iso</i> <sub>10</sub>	39,1	<i>Iso</i> <sub>10</sub>	38,7

**Tabla 3.6:** Diferencias de la energía libre de Gibbs en Kcal/mol de cada isómero conformacional del ácido fosfórico sustituyendo dos hidrógenos por dos halógenos.

Si se observa la tabla 3.6, el vacío de los isómeros 3, 4 y 5 del  $HF_2PO_4$  se debe a que las geometrías propuestas no se optimizaron ya que no se llegó a un mínimo de energía.

## 3.2. Acidez en fase gas

La acidez en fase gaseosa de un ácido neutro HA se refiere al siguiente equilibrio:



Donde  $\Delta G$  es la acidez en fase gaseosa, dicha cantidad es de interés fundamental y proporciona información valiosa sobre las propiedades intrínsecas, independientes del disolvente de los ácidos. [5]

Con el fin de estudiar el impacto de las sustituciones de hidrógenos por halógenos en la acidez en fase gas de los ácidos, se han diseñado más estructuras sustituyendo

hidrógenos por flúor. Para calcular la acidez en fase gas se han hecho los mismos cálculos computacionales con sus aniones.

ACIDEZ			
Ácido	$\Delta G$	$\Delta G_{exp}$	$\Delta G_{H.especf}$
$CF_3COOH$	314,0	316,3	309,0
$CF_3COSH$	311,6	312,5	303,4
$CF_3SO_3H$	292,9	299,5	292,3
$FHSO_3$	293,6	299,8	293,1
$H_2CF_3COOH$	328,1	—	320,6
$H_2CF_3COSH$	324,0	—	314,5
$H_2CF_3SO_3H$	303,6	—	302,9
$H_2CO_3$	328,0	—	319,7
$H_2S_2O_6$	281,8	—	283,4
$H_2SO_4$	302,6	302,2	301,3
$H_3CCOOH$	338,6	—	328,9
$H_3CCOSH$	330,5	—	319,5
$H_3CSO_3H$	312,7	315,0	309,7
$HCF_2COOH$	321,4	—	315,0
$HCF_2COSH$	316,8	—	308,6
$HCF_2SO_3H$	297,9	—	298,4
$HPO_3$	303,5	303,3	300,9
$HNO_3$	315,0	317,8	309,5
$H_3PO_4$	321,4	—	332,6
$HF_2PO_4$	385,7	—	
$HFSO_4$	283,0	—	
$HClSO_4$	293,3	—	288,5
$HFCO_3$	309,1	—	
$HClCO_3$	312,5	—	
$H_2ClPO_4$	337,0	—	
$HCl_2PO_4$	332,2	—	
$H_2FPO_4$	329,3	—	

**Tabla 3.7:** Acideces en fase gas con y sin hidratación específica y el valor experimental en Kcal/mol. [5]

Se han estudiado distintos tipos de ácidos, por un lado, los oxácidos estudiados en la parte 1 del presente trabajo añadiendo alguno más y, por otro lado, algunos ácidos orgánicos de interés, así se hace un estudio de acidez en fase gaseosa más extenso y riguroso.

Los resultados dados en la Tabla 3.8 apoyan el siguiente orden de acidez intrínseca para los ácidos orgánicos:  $CF_3SO_3H > HCF_2SO_3H > H_2CF_3SO_3H > CF_3COSH >$

$H_3CSO_3H > CF_3COOH > HCF_2COSH > HCF_2COOH > H_2CFCOSH > H_2CFCOOH > H_3CCOSH > H_3COOH$ , y el siguiente para los oxácidos:  $H_2S_2O_6 > FHSO_3 > H_2SO_4 > HPO_3 > HNO_3 > H_3PO_4 > H_2CO_3$ .

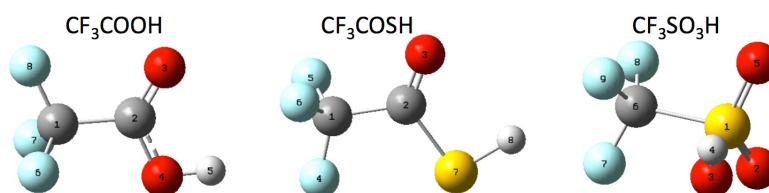
Los ácidos llamados normalmente fuertes ( $CF_3SO_3H$ ,  $FHSO_3$ ,  $HCF_2SO_3H$ ,  $H_2SO_4$ ,  $HPO_3$ ,  $H_2CFSO_3H$ ) están en un intervalo de acidez relativamente estrecho (10,7 kcal/mol), se tienen algunos valores experimentales, donde la variación con los calculados computacionalmente no llega a las 3 Kcal/mol exceptuando al  $CF_3SO_3H$  y al  $FHSO_3$  que difieren de 6-7 kcal/mol, al tener una diferencia tan alta, se ha llevado a cabo un cálculo G4 para estos dos últimos ácidos con el fin de ver si el primer cálculo sobreestima la acidez de dichos ácidos.

Ácido	$\Delta G$	$\Delta G_{exp}$
$CF_3SO_3H$	291,9	299,5
$FHSO_3$	294,8	299,8

**Tabla 3.8:** Acideces en fase gas con el método G4 en Kcal/mol

En vista de los resultados obtenidos con el método compuesto G4 se observa como la acidez no varía prácticamente nada (1,5Kcal/mol) en comparación con el cálculo DFT, pero podemos decir que dicho método sobreestima la acidez del compuesto inorgánico y subestima la del ácido orgánico y, como era de esperar, el método G4 describe mejor su acidez que el método DFT B3LYP/6-311G\*\*.

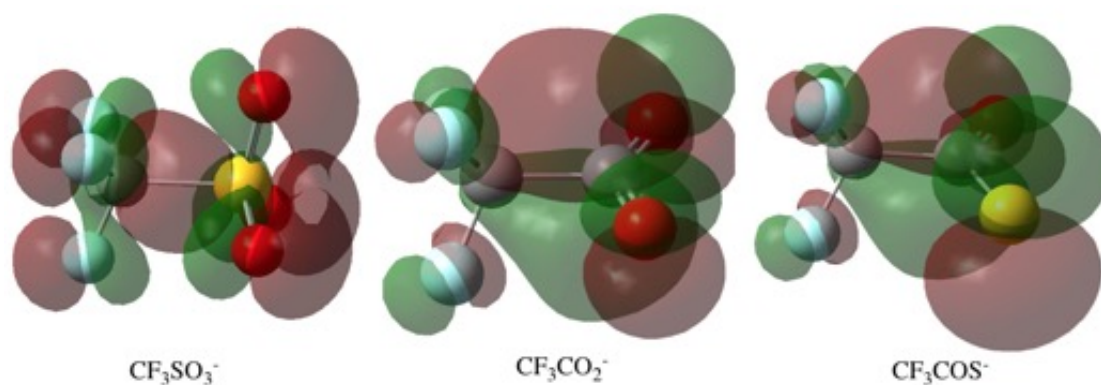
La acidez es proporcional a la tendencia del ácido a perder un protón. Se ve como el orden de acidez sustituyendo el grupo ácido es  $COOH < COSH < SO_3H$ , ya que en los aniones correspondientes se debe tener en cuenta la estabilización por resonancia, deslocalización de enlaces  $\pi$  (figura 3.6), que es mayor en el  $SO_3^-$  ya que hay mayor número de átomos, en cuanto a las otras dos estructuras, los iones  $COS^-$  y  $COO^-$  son estabilizados por resonancia, pero en el  $COS^-$  es mayor, se puede explicar observando la carga natural en dichos átomos dada en la tabla 3.9. Ver figura 3.5.



**Figura 3.5:** Ácidos con tres átomos de flúor

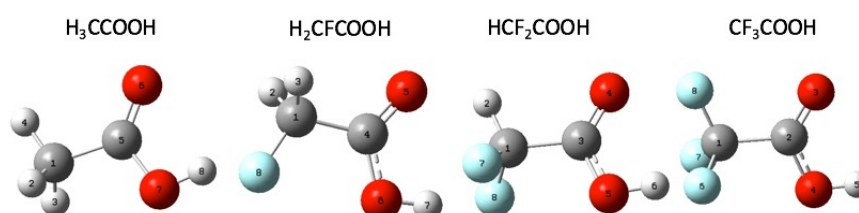
$SO_3^-$	Carga Natural	$COS^-$	Carga Natural	$COO^-$	Carga Natural
S	2.21439	C	0.22678	C	0.68743
O	-0.97579	O	-0.61533	O	-0.73587
O	-0.97575	S	-0.48786	O	-0.74097
O	-0.97579	—	—	—	—

**Tabla 3.9:** Cargas naturales de la moléculas  $CF_3$ — grupo ácido



**Figura 3.6:** Orbitales moleculares HOMO.

Comparamos también sustitución de átomos de flúor por átomos de hidrógeno en el grupo  $CF_3$  de la molécula. En la tabla 3.7 se ve que cuantos más átomos de flúor haya en la molécula mayor es su acidez, esto se debe a la elevada electronegatividad del flúor, cuantos más átomos de flúor haya, mayor capacidad atractora tendrá el grupo, y mayor será el efecto inductivo, polarización de carga transmitida por enlaces  $\sigma$ , si se observan los máximos de densidad en el enlace O-H de cada molécula, (figura 3.8) y las cargas naturales de dichos átomos (tabla 3.10) se comprueba la facilidad de romper dicho enlace en presencia de átomos electronegativos.



**Figura 3.7:** Ácidos carboxílicos con diferentes sustituciones de hidrógenos por átomos de flúor.

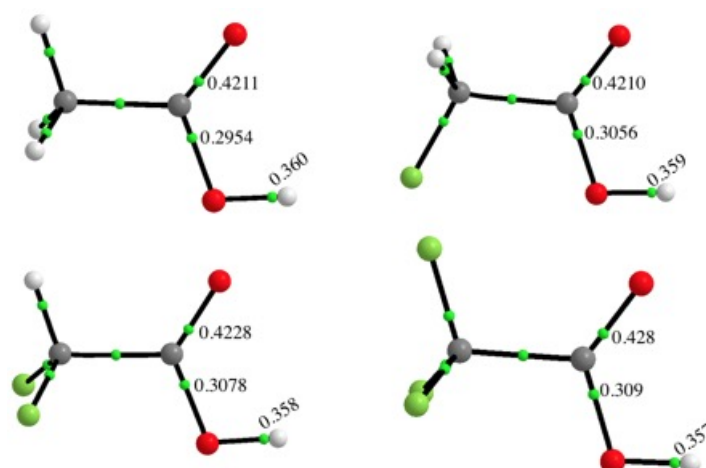


Figura 3.8: Máximos de densidad de enlace.

Como se ven en la figura 3.8 a medida que aumentamos el número de átomos de flúor, disminuye la densidad electrónica debido a que, como se ha dicho antes, el flúor es un grupo atractor, el enlace O-H se debilita facilitando su ruptura, traduciéndose esto en un aumento de su acidez.

$CF_3-$	Carga Nat.	$HCF_2-$	Carga Nat.	$H_2CF-$	Carga Nat.l	$H_3C-$	Carga Nat.
C	1.01480	C	0.51364	C	-0.00147	C	-0.68072
C	0.72404	H	0.21440	H	0.18224	H	0.22348
O	-0.53625	C	0.73986	H	0.18224	H	0.22348
O	-0.66183	O	-0.57168	C	0.78381	H	0.21946
H	0.48893	O	-0.69699	O	-0.59271	C	0.82796
F	-0.34630	H	0.52359	O	-0.66617	O	-0.59224
F	-0.34629	F	-0.36121	H	0.47979	O	-0.69688
F	-0.33709	F	-0.36161	F	-0.36772	O	0.47546

Tabla 3.10: Carga Natural de moléculas con el grupo carboxi

ESTA TABLA, LA 3.12 LA QUITO?

### 3.2.1. Hidratación específica

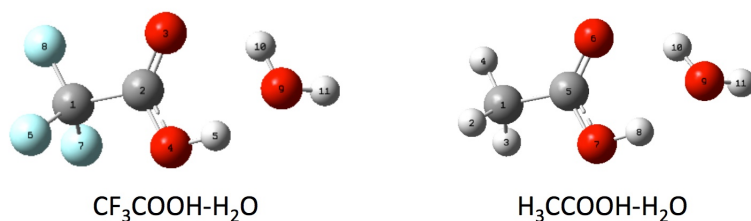
Se estudia el impacto que tiene la hidratación específica en la acidez en fase gaseosa de las moléculas anteriores, en la tabla 3.7 también se indica los valores de acidez en presencia de una molécula de agua en el sitio ácido. A la vista de los resultados expuestos, la acidez aumenta al haber una molécula de agua en el punto ácido, ya que se forman

enlaces de hidrógeno fuertes como se puede comprobar mirando las distancias  $d(O-H)$  y teniendo en cuenta la existencia de un máximo de densidad en dichos enlaces en la tabla 3.13.

### TENGO QUE MIRAR DETENIDAMENTE EL $H_3PO_4$ Y $H_3PO_4-H_2O$

Ácidos- $H_2O$	distancia	$d(O \cdots H)$ (Å)	$Max_{densidad}(u.a.)$
$CF_3COOH - H_2O$	$d(O_9 - H_5)$	1,693	0,04665
	$d(O_3 - H_{10})$	2,137	0,01852
$CF_3COSH - H_2O$	$d(O_9 - H_8)$	1,923	0,03014
	$d(O_3 - H_{10})$	2,049	0,02064
$CF_3SO_3H - H_2O$	$d(O_{10} - H_4)$	1,614	0,05653
	$d(O_5 - H_{12})$	2,191	0,01631
$FHSO_3 - H_2O$	$d(O_7 - H_4)$	1,610	0,05682
	$d(O_5 - H_8)$	2,313	0,01323
$H_2CFCOOH - H_2O$	$d(O_9 - H_7)$	1,735	0,04251
	$d(O_5 - H_{11})$	2,012	0,02375
$H_2CFCOSH - H_2O$	$d(O_3 - H_{10})$	1,985	0,02356
	$d(O_9 - H_6)$	1,990	0,02633
$H_2CF SO_3H - H_2O$	$d(O_{10} - H_4)$	1,649	0,05205
	$d(O_5 - H_{11})$	2,079	0,02015
$H_2CO_3 - H_2O$	$d(O_7 - H_5)$	1,737	0,04163
	$d(O_2 - H_9)$	2,201	0,01575
$H_2S_2O_6 - H_2O$	$d(O_{11} - H_{10})$	1,548	0,06753
	$d(O_2 - H_{12})$	2,048	0,01959
$H_2SO_4 - H_2O$	$d(O_8 - H_5)$	1,651	0,05181
	$d(O_6 - H_9)$	2,146	0,01768
$H_3CCOOH - H_2O$	$d(O_9 - H_8)$	1,767	0,03947
	$d(O_6 - H_{10})$	1,961	0,02645
$H_3CCOSH - H_2O$	$d(O_3 - H_{10})$	1,958	0,02496
	$d(O_9 - H_5)$	2,000	0,02587
$H_3CSO_3H - H_2O$	$d(O_{10} - H_4)$	1,689	0,04736
	$d(O_5 - H_{11})$	2,065	0,02080
$HCF_2COOH - H_2O$	$d(O_9 - H_6)$	1,715	0,04446
	$d(O_4 - H_{11})$	2,078	0,02083
$HCF_2COSH - H_2O$	$d(O_9 - H_7)$	1,949	0,02858
	$d(O_3 - H_{10})$	2,021	0,02186
$HCF_2SO_3H - H_2O$	$d(O_{10} - H_4)$	1,634	0,05386
	$d(O_5 - H_{12})$	2,110	0,01899
$HPO_3 - H_2O$	$d(O_6 - H_2)$	1,659	0,05063
	$d(O_4 - H_7)$	2,103	0,01920
$HNO_3 - H_2O$	$d(O_6 - H_2)$	1,677	0,04803
	$d(O_4 - H_7)$	2,261	0,01515

**Tabla 3.11:** Análisis de enlaces de hidrógeno en los ácidos objeto de estudio.

**Figura 3.9:** Ácidos- $\text{H}_2\text{O}$ 

Teniendo en cuenta el análisis NBO de dichas moléculas también comprobamos la mayor facilidad para romper el enlace O-H cuando se expone el ácido a la hidratación específica. En la molécula  $\text{H}_3\text{COOH}$ , los dos pares libres de electrones del átomo  $\text{O}_7$  donan electrones, en forma de energía de 5,69 y 44,35 Kcal/mol, al enlace  $\text{C}_5 = \text{O}_6$  mientras que en la molécula de  $\text{H}_3\text{COOH} - \text{H}_2\text{O}$ , al formar un enlace de hidrógeno, los pares libres del  $\text{O}_7$  donan, expresando el valor en energía, 7,28 y 53,66 Kcal/mol, por lo que el enlace O-H se debilita, y en consecuencia aumenta la acidez de dicha molécula. La diferencia de acidez entre el  $\text{CF}_3\text{COOH}$  y el  $\text{H}_3\text{COOH}$  es de 24,53 Kcal/mol, hidratando los ácidos de forma específica ( $\text{CF}_3\text{COOH} - \text{H}_2$  y  $\text{H}_3\text{COOH} - \text{H}_2\text{O}$ ) la diferencia se reduce a 19,89 Kcal/mol. Esto lleva a pensar que el efecto del agua en ese punto, en el ácido trifluoretanoico, no es completo, puesto que el efecto inductivo de los tres halógenos compite con este. En el caso del ácido etanoico, al no tener efecto inductivo por parte de ningún halógeno, el incremento de la acidez de dicho ácido es mayor al ser hidratado. Se ven algunas de las distancias de dichos ácidos en la tabla 3.14.

	d(C-F)	d(O-H)	d(C=O)		d(O-H)	d(C=O)
$\text{CF}_3\text{COOH}$	1,34	0,97	1,19	$\text{H}_3\text{CCOOH}$	0,97	1,21
$\text{CF}_3\text{COOH} - \text{H}_2\text{O}$	1,34	0,99	1,21	$\text{H}_3\text{CCOOH} - \text{H}_2\text{O}$	0,99	1,22

**Tabla 3.12:** Distancias internucleares de interés de cada ácido en Å

Las d(C-F) son las mismas para las dos moléculas, en las demás distancias se observa una pequeña variación, haciendo uso del análisis NBO se ve que un par de electrones libre del  $\text{O}_9$  de la molécula de  $\text{CF}_3\text{COOH} - \text{H}_2\text{O}$  actúa como donador de electrones, expresando esa donación en energía sería de 24,26 Kcal/mol al enlace  $\text{O}_4 - \text{H}_5$ , actuando este último como aceptor, no hay prácticamente retrodonación por parte del  $\text{O}_4 - \text{H}_5$ , 0,06 Kcal/mol. En contraste, en la molécula  $\text{H}_3\text{COOH} - \text{H}_2\text{O}$ , uno de los pares de electrones libres del  $\text{O}_9$  dona el par en 18,59 Kcal/mol de energía al enlace  $\text{O}_7 - \text{H}_8$ , en este caso la retrodonación es nula por parte del enlace  $\text{O}_7 - \text{H}_8$ . La donación por uno de los pares de electrones libres de los átomos de oxígeno  $\text{O}_4$  y  $\text{O}_7$  respectivamente, a los enlaces C=O correspondientes, es mayor en el ácido  $\text{CF}_3\text{COOH} - \text{H}_2\text{O}$  que en el  $\text{H}_3\text{CCOOH} - \text{H}_2\text{O}$ .



# Capítulo 4

## Conclusión

1. Para determinar la estabilidad de diferentes conformeros de ácidos en fase gas, hay que tener en cuenta la posible formación de enlaces de hidrógeno intramoleculares.
2. La estabilidad de oxácidos en fase gas depende de la electronegatividad de los sustituyentes y de el tamaño de los mismos, siendo dentro de un período, más estable una molécula con los sustituyentes más electronegativos, y dentro de un grupo más estable la molécula con los sustituyentes de mayor tamaño.
3. El efecto inductivo en ácidos orgánicos en fase gas tiene un papel de elevada importancia en la acidez de éstos en fase gas, utilizando métodos DFT con una base relativamente grande como es la 6-311+G(2df,2p) se tiene la sucesión indicada en el apartado anterior y produce un acuerdo bastante satisfactorio con los valores experimentales, **aun así sobreestima la acidez de algunos ácidos alrededor de 5 Kcal/mol.**, los cálculos G4 son mucho más precisos y sería el siguiente paso para continuar con el estudio.
4. La acidez aumenta con el efecto de la hidratación específica en fase gas por la formación de enlaces de hidrógeno muy fuertes, pero el impacto de esta hidratación compite con el efecto inductivo del cloro y el incremento de acidez no es muy elevado.
5. Los cálculos DFT se completaron en 11 moléculas sin mediciones experimentales, proporcionando así una base de datos termoquímica y estructural rigurosa para futuros estudios termodinámicos.



# Bibliografía

- [1] Alcañiz, E. de Jesús *Química Inorgánica*. Recuperado de <http://www3.uah.es> Págs. 35-54 2012
- [2] Jones, L. / Atkins (2012) *Principios de Química. 5a ed.* Editorial Médica Panamericana Págs. 401-453
- [3] C. Lee, W. Yang and R.G. Parr. *Phys. Rev. B* 37 (1988) 785
- [4] A. D. Becke *J. Phys. Chem.*, 88 (1998) 1053
- [5] *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 122, No. 21, 2000 Págs. 5114-5124
- [6] Bertran Rusca, J.; Branchadell Gallo, V.; Moreno Ferrer, M.; Sodupe Roure, M. (2012) *Química Cuántica. 1a ed.* Editorial Síntesis Págs. 169-198
- [7] Joseph W. Ochterski, Ph.D *Thermochemistry in Gaussian*. 2000
- [8] Frank Weinhold and Eric D. Glendening. (s.f) Natural Bond Orbital. Analysis Programs. Madison, Wisconsin 53706, USA: *Natural Bond Orbital 6.0 Homepage*. Recuperado de [http : //nbo.chem.wisc.edu/nbo6abman.pdf](http://nbo.chem.wisc.edu/nbo6abman.pdf)
- [9] Weinhold, F; Landis, C. R. (2005) *Valency and Bonding. A natural Bond Orbital Donor-Acceptor Perspective*. Cambridge
- [10] Bader, R. F. W *Acc. Chem. Res.*, 1985, 18 (1), pp 9-15
- [11] J. Chem. Eng. Data 2010, 55, 5359-5364
- [12] Bader, R. F. W. (2000). AIM 2000 program. McMaster University, Hamilton, ON.
- [13] Frisch, A. (Ed.). (2004). Gaussian 03. Gaussian.