

Estudio del Comportamiento Caótico en el Goteo de una Canilla

Artuso, Carolina ^a. Satz, Alejandro ^b.

^a)caritoartdeco @yahoo.com ^b) satz @ciudad.com.ar

Laboratorio 5, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Pabellón I,
Universidad de Buenos Aires

El presente trabajo tuvo como objetivo analizar el comportamiento no lineal del goteo en una canilla. En particular, se estudiaron las variaciones en el período entre gotas como así también la relación existente entre éste y el flujo. Para ello, se montó un dispositivo experimental el cual nos permitió variar el flujo de agua mediante una válvula. Por otro lado, el goteo fue registrado con un micrófono colocado dentro de un recipiente de lata, de forma tal que las gotas al caer producen un ruido en el mismo el cual es registrado con el micrófono conectado a su vez a la PC. Una vez levantado el goteo para 17 flujos diferentes se procedió a realizar los mapas temporales, es decir, graficar el período $n+1$ contra el período n ; encontrándose tanto períodos regulares como atractores de diversos períodos definidos y atractores extraños.

INTRODUCCIÓN

El término caótico se suele utilizar para describir sistemas no lineales cuya dinámica evoluciona de puntos estables a estados en los cuales no se puede determinar una regularidad u orden.

La dinámica del goteo de una canilla ha sido objeto de estudio como ejemplo de un sistema caótico. En 1977, Rosseler sugirió que la formación de las gotas podría exhibir un comportamiento caótico a medida que el flujo es variado. Años más tarde, Shawn se observaron en este sistema, desdoblamiento de período, intermitencia, bifurcaciones.^{1,2,3}

Si bien se ha intentado modelar el comportamiento del goteo desde que Rosseler introdujo su teoría, no se ha encontrado un modelo matemático simple que pueda explicar el complejo fenómeno observado en este sistema. Uno de los primeros modelos consistió en pensar al sistema como uno compuesto por una masa unida a un resorte, es decir un oscilador armónico amortiguado. De todas formas, la simplicidad del mismo despreciaba la influencia de parámetros que resultan cruciales para poder entender el fenómeno. Un modelo posterior y un tanto más complejo introduce un nuevo parámetro, supone que la masa de la gota de debe depender del valor de la columna de agua.^{1,2,3}

Años más tarde, Kiyono y Fuchikami se concentraron en la dinámica del fluido y sugirieron que el rompimiento de la gota tiene lugar en dos etapas. La primera parte es el rompimiento de la gota principal. La segunda parte, inmediatamente después de la separación de la gota principal, consta de la oscilación en el fluido dejado en la canilla en la cual la tensión superficial es una fuerza de restauración, causando la formación de una segunda gota. Esta hipótesis sugiere que el intervalo temporal entre gotas está solamente determinado por el valor de la masa remanente en la canilla después de la caída de la gota principal.^{1,2,3}

Siguiendo con esta idea, las gotas son afectadas por diversos parámetros como la tensión superficial, fluctuaciones de temperatura, presión, forma de la canilla, etc. De todas formas, de todos estos parámetros parece que la tensión superficial en la canilla es el más relevante si la presión se mantiene constante.^{1,2,3}

La tensión superficial se define como la fuerza por unidad de longitud normal a cualquier curva en la superficie y tangente a la curva misma: $\gamma = \pi y d \cos \theta$, siendo d el diámetro de la canilla y θ el ángulo entre el plano tangente a la gota y el plano vertical. Cuando la gota cae, emite una onda de presión hacia atrás, es decir hacia el remanente de agua que pende de la canilla haciéndolo oscilar violentamente de forma tal que θ varía para la siguiente gota de forma

complicada. Para flujos muy bajos las vibraciones se detienen antes de que la segunda gota caiga por lo que siempre se ve el mismo período. Al aumentar el flujo las oscilaciones no alcanzan a detenerse y por lo tanto afectan a la siguiente gota. Esto es lo que causa el desdoblamiento de períodos y otros efectos caóticos.^{1,2,3}

Un posible estudio de la dinámica del goteo presente en una canilla es medir el intervalo de tiempo t_n entre dos gotas sucesivas n y $n-1$. Una serie temporal se obtiene graficando el intervalo t_{n+1} contra el período t_n , obteniendo así un mapa bidimensional. Eventualmente puede suceder que el comportamiento sea más complicado y haya que recurrir a mapas en tres dimensiones, es decir graficar el período t_{n+2} contra el t_{n+1} contra el t_n . Un flujo regular produce un solo punto el cual es conocido como atractor 1-período. Esto equivale a un estado en el cual las gotas abandonan la canilla en intervalos iguales de tiempo. A medida que se aumenta el flujo aparecen una secuencia de atractores hasta que el flujo se hace continuo. Una posible secuencia es que el sistema vaya de un ritmo constante a otro en el cual dos gotas dejan la canilla. Este fenómeno se denomina bifurcación y equivale a un atractor 2-período. Al aumentar el flujo aún más aparecen atractores 4-período y otros más complicados.^{1, 5}

Existen otros caminos hacia el comportamiento caótico. Si a un flujo dado, la caída de las gotas es regular y estable pero es interrumpida por “bursts” de otras gotas cuando el flujo es levemente aumentado aparece un fenómeno denominado intermitencia. En este caso las gotas extras aparecerán más frecuentemente a medida que se aumente el flujo. En los mapas temporales esto se traducirá en la existencia de atractores 3-período.¹

En las próximas secciones se describirá el dispositivo experimental utilizado para registrar los intervalos entre gotas como así también los mapas temporales obtenidos.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Como hemos mencionado en esta experiencia nos hemos propuesto analizar el comportamiento no lineal existente en el período del goteo de una canilla. Es decir, nos dedicamos a estudiar cómo afectaba la variación del flujo de agua la frecuencia de goteo. Para llevar a cabo este objetivo montamos un dispositivo experimental tal como el que muestra la figura 1.

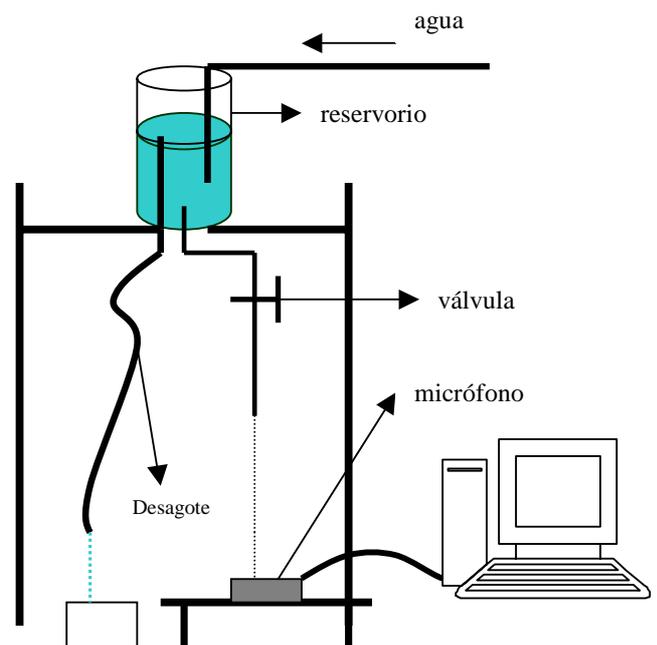


Figura 1: dispositivo experimental utilizado

El arreglo experimental consta de un reservorio de agua conectado a un tubo de goma de mm de diámetro del cual penden las gotas. Con el fin de poder producir variaciones en el flujo, colocamos una válvula de aguja a la salida del reservorio. El goteo proveniente del tubo fue registrado con un sistema de audio. Se colocó debajo de aquél un recipiente de lata dentro del cual se encontraba un micrófono conectado una tarjeta de sonido de la PC vía un circuito para conformar la señal proveniente del mismo. Las gotas al caer producían un ruido en la misma el cual era detectado. Estos “ticks” fueron grabados con el programa de audio Soundforge 4.5 en archivos tipo *.wav para

luego exportarlos a otro que nos permitiese estudiar mejor los resultados obtenidos, es decir, calcular el tiempo transcurrido entre gotas utilizando el programa Origin 5.0.

Cada una de las mediciones debían realizarse a flujo constante, de caso contrario los resultados obtenidos podrían deberse a un comportamiento intrínseco del sistema o a una consecuencia de la variación de dicho parámetro. Para lograr mantener el flujo constante se alimentó y desagotó el reservorio constantemente vía dos tubos de igual diámetro

De esta forma se mantuvo la altura del agua constante y por ende el flujo.

Una vez montado el dispositivo se procedió a abrir levemente la válvula de aguja de forma tal de obtener un goteo muy suave. El mismo fue registrado con el sistema de audio durante 1 minuto. Posteriormente se procedió a medir el flujo registrando la cantidad de agua “caída” en una probeta durante un cierto intervalo de tiempo.

Este procedimiento fue repetido para 17 flujos diferentes. Para cada uno de ellos se analizó la relación existente entre el período n y el $n + 1$, como así también la variación de los mismos en el tiempo. En la próxima sección se pueden encontrar los resultados obtenidos.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como se ha dicho en la sección anterior hemos registrado los períodos entre gotas provenientes de una canilla al producir variaciones en el flujo de agua en la misma.

Como primer paso en nuestro análisis hemos graficado los mapas temporales, es decir el período t_{n+1} en función del período t_n , con el objeto de detectar atractores, es decir encontrar las clases y cantidad de órbitas presentes. En las próximas páginas se describen los resultados obtenidos para los diversos flujos, tanto los mapas temporales como sus series temporales correspondientes: En la siguiente figura se puede observar el mapa temporal para un flujo de 7.33 ml/s:

Se puede observar un cúmulo disperso centrado en 0.591 segundos. De todas formas el rango dentro del cual fluctúan los intervalos es pequeño, razón por la cual

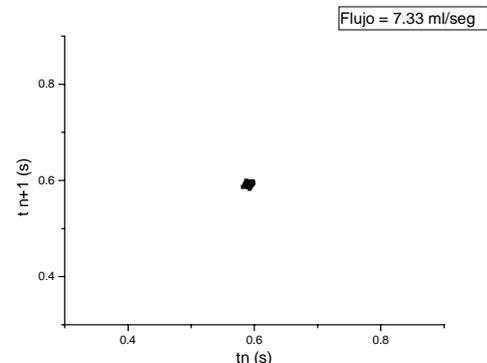


Figura 2-a: mapa temporal para un flujo de 7.33 ml/s

podemos considerar que sólo existe un período bien definido, siendo un atractor de período 1. Para corroborar esta hipótesis, se muestra a continuación la serie temporal

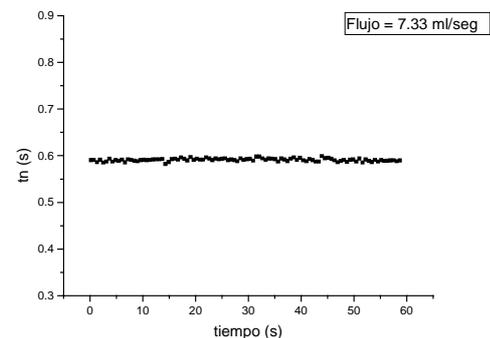


Figura 2-b: serie temporal para un flujo de 7.33 ml/s

correspondiente a este flujo, es decir, la variación del intervalo en función del tiempo.

En esta figura se observa una única franja alrededor del mismo período que el mencionado anteriormente.

Al aumentar el flujo a 13 ml/seg se obtiene el siguiente mapa temporal:

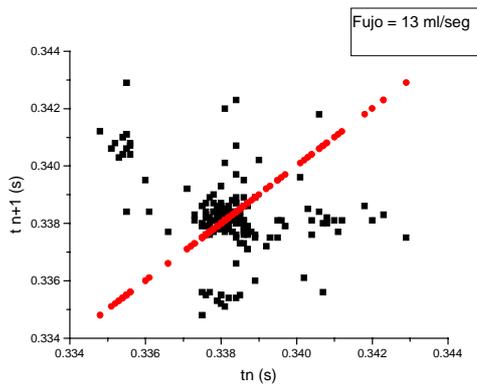
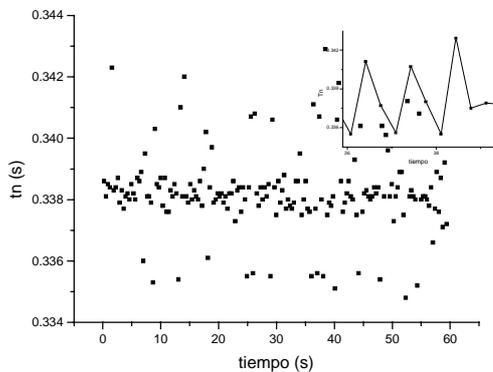


Figura 3-a: mapa temporal para un flujo de 13 ml/s

En esta última figura se observa una concentración central de puntos en los 0.338 segundos alrededor de la cual se acomodan otras tres menos densas. A diferencia del caso anterior se puede ver la presencia de más de un período. Para saber cómo son visitados los mismos es necesario analizar la serie temporal correspondiente, la cual se presenta



a continuación:

Figura 3-b: serie temporal para un flujo de 13ml/s

Se puede observar una línea central alrededor de la cual se ubican puntos hacia arriba y abajo. Al estudiar cómo son visitados los distintos intervalos, se observó que conviven más de una órbita inestable. Principalmente existe una órbita de período regular en 0.338 segundos y una órbita de período 3 en la cual el sistema va de un intervalo de 0.341 seg a 0.338 seg luego a 0.336 y vuelve a 0.341 seg.

El siguiente flujo estudiado fue de 21 ml/seg; su mapa temporal se muestra a continuación:

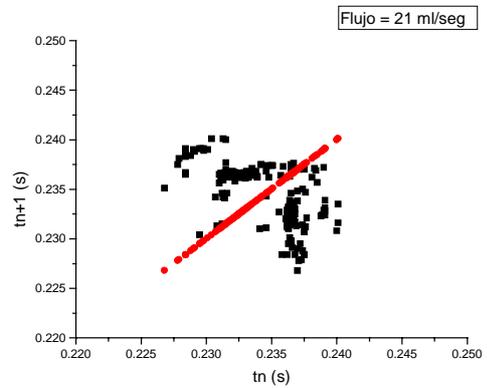


Figura 4-a. Mapa temporal para un flujo de 21 ml/s

Se pueden detectar 3 congregaciones de puntos, dos de las cuales son más densas. Estos tres cúmulos se ordenan en una surte de letra L invertida y simétrico respecto de una recta a 45°. Nuevamente para determinar qué clase de órbitas están presentes debemos mirar la serie temporal correspondiente:

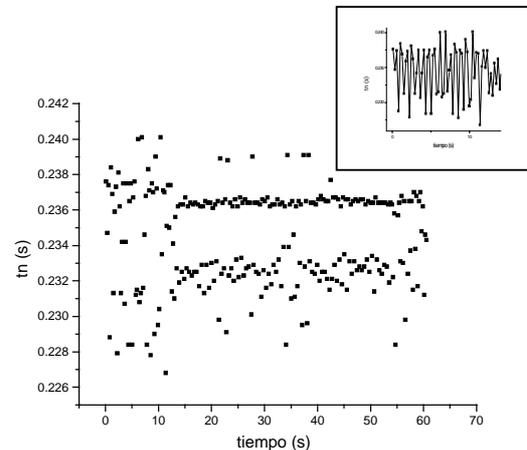


Figura 4-b: serie temporal para un flujo de 21ml/s

Aquí se puede observar que durante los primeros 10 segundos parecen convivir tres intervalos distintos. Pasado este tiempo solo sobreviven dos intervalos en 0.236 y 0.232

por lo que el sistema se encontraría en un atractor de período 2. Los primeros segundos parecen pertenecer a un transitorio en el cual los intervalos se recorren de 0.228 segundos va a 0.237 seg, 0.237 seg y vuelve a 0.228 seg; por lo que sería una órbita de período 3. El siguiente flujo estudiado corresponde a 29ml/seg y su mapa temporal se muestra a continuación:

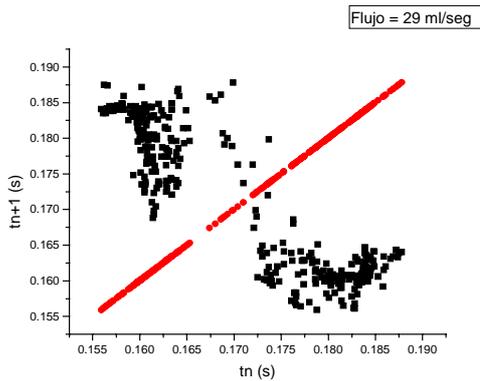


Figura 5-a: mapa temporal para un flujo de 29ml/s

En esta figura se observan dos cúmulos bien definidos conectados por algunos puntos. Si se observa la forma descrita con atención podría pensarse que estamos en presencia de un mapa cuártico. La próxima figura muestra la evolución temporal de los intervalos:

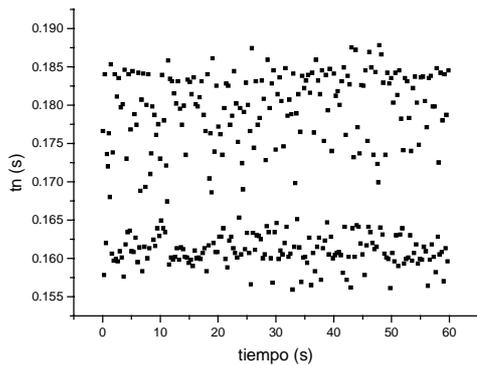


Figura 5-b: serie temporal para flujo de 29ml/s

Se observan dos franjas de puntos centradas en 0.185 seg y 0.160 seg. La franja superior es más dispersa que la inferior. Si se estudia cómo son recorridos estos intervalos, se

puede suponer que se trata de un atractor de período 2, va de “abajo hacia arriba” subiendo algunas veces más que otras. Es decir va de un intervalo perteneciente a la franja centrada en 0.160 segundos a otro en la franja superior centrada en 0.185 segundos; de todas formas, al ir hacia la franja superior algunas veces va a puntos más bajos que otros, es decir de intervalo menor, y otras “sube más”, va hacia puntos de intervalo mayor. Estudiando este comportamiento se intentó encontrar algún patrón en él, sin éxito. Por dicha razón no podemos afirmar otra cosa más que estamos en presencia de un aparente período 2.

El siguiente flujo estudiado fue el correspondiente a 31 ml/seg. A continuación se puede observar su mapa temporal:

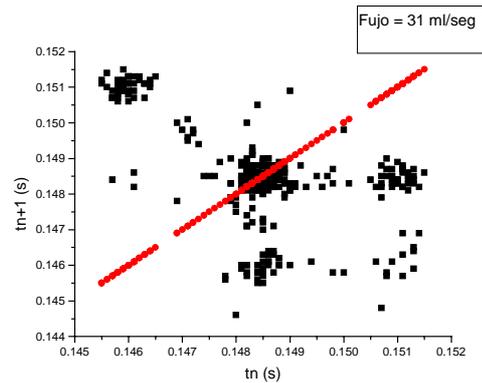


Figura 6-a: mapa temporal para un flujo de 31ml/s

Se observan 4 cúmulos bien definidos. Un punto perteneciente al (0.148;0.148) puede evolucionar hacia otro ubicado en (0.146;0.148) o a (0.151;0.148) o quedarse allí ; desde el (0.148;0.1469) al (0.148;0.1489) o hacia el (0.146;0.151) y desde éste hacia el (0.151;0.148). En la siguiente figura se muestra un esquema de cómo se recorren estos intervalos ,aunque alternados con otros:

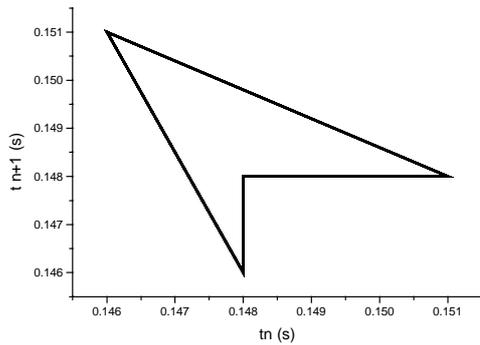


Figura 6-b: esquema de cómo se recorren los intervalos para un flujo de 31 ml/s

Para estudiar mejor el comportamiento del sistema para este flujo conviene analizar la serie temporal correspondiente; la misma se muestra a continuación en la figura 6-c:

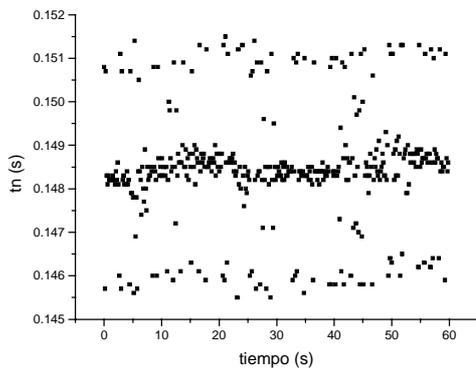


Figura 6-c: serie temporal para un flujo de 31ml/s

Si se estudia este último gráfico en detalle, se puede observar la convivencia de dos órbitas inestables. Una de período 1, es decir se mantiene en el intervalo de 0.148 seg y otra que va desde los 0.146 seg a los 0.151 seg.

Ambas órbitas se interrumpen mutuamente; es decir un pequeño apartamiento de las condiciones iniciales hace que el sistema abandone la órbita que está recorriendo. De todas formas es interesante observar que estos apartamientos hacen que el sistema caiga siempre en una de estas dos órbitas.

La siguiente medición se realizó para un flujo de 35 ml/seg, obteniéndose un solo punto en el mapa temporal correspondiente lo que implica la existencia de un solo período en 0.15 segundos.

La figura 8-a muestra el mapa correspondiente a un flujo de 37 ml/seg:

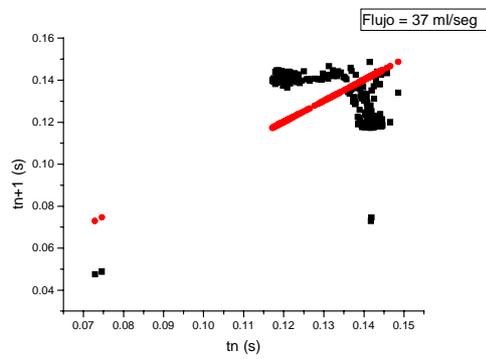


Figura 7-a: mapa temporal para un flujo de 37 ml/seg

Se pueden observar dos cúmulos densos conectados por puntos intermedios, describiendo en su conjunto una suerte de L invertida. Se puede ver que esta forma presenta ciertas similitudes con la presente en la figura 5-a. Para poder describir con mayor precisión lo que sucede aquí conviene estudiar la serie temporal correspondiente:

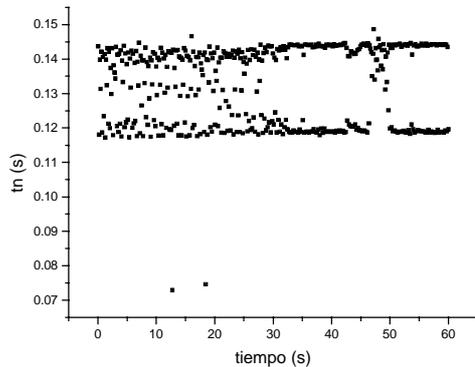


Figura 7-b: serie temporal para un flujo de 37 ml/s

Durante los primeros 20 segundos se observan tres líneas, es decir, tres intervalos diferentes. Transcurrido este tiempo sólo sobreviven dos de ellas, razón por la cual se puede suponer que los primeros instantes pertenecen a un transitorio o que el sistema ha sufrido un cambio violento que lo ha hecho ir a un estado en el cual solamente dos intervalos están presentes. Dentro del régimen aparentemente transitorio se puede observar la convivencia de dos órbitas de período 2: una que visita el intervalo menor, luego el mayor y vuelve al menor y otra en la cual visita el mayor va al del medio y vuelve al superior. Pasados estos 20 seg iniciales el sistema queda en una órbita de período 2, visitando alternadamente los dos intervalos presentes. Se puede ver aquí también una bifurcación en el período. El flujo anterior correspondía a un régimen regular, es decir, una órbita de período 1, mientras que aquí estamos en presencia de una de período 2.

La siguiente medición que se realizó fue para un flujo de 41 ml/seg donde se observó un cúmulo disperso centrado en 0.17 segundos el cual parece estar dividido en varias regiones, observándose una ruptura con el comportamiento anterior. Intentar obtener información acerca del comportamiento del sistema a partir del mapa temporal resultaría complicado, es por ello que convino estudiar la serie temporal correspondiente, en la cual

se observó durante los primeros 10 segundos la presencia de 4 intervalos diferentes, entre los 10 y los 30 segundos sobreviven sólo 3 de éstos y durante los últimos 30 segundos vuelven a convivir 4 intervalos. Se analizó el orden en que estos intervalos eran visitados en los tres regímenes sin encontrar ningún patrón aparente.

A continuación se presenta la serie temporal

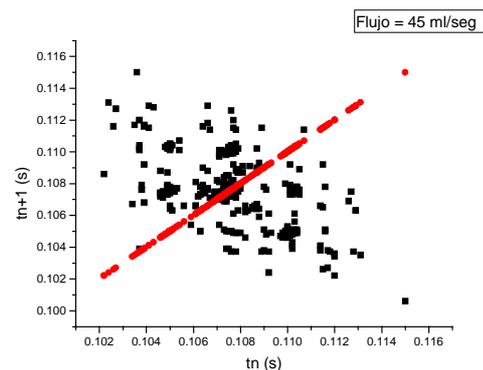


Figura 8-a: mapa temporal para un flujo de 45ml/s

correspondiente a un flujo de 45 ml/seg:

Aquí de nuevo se observa un cúmulo aún más disperso que en el caso anterior y centrado unos segundos por debajo del mismo, en 0.108 segundos. También se puede ver que se encuentra dividido en zonas más definidas.

En la siguiente figura se muestra la serie temporal correspondiente:

Durante los primeros 10 segundos conviven varios intervalos diferentes. Entre los 15 segundos y los 25 segundos, existen 3

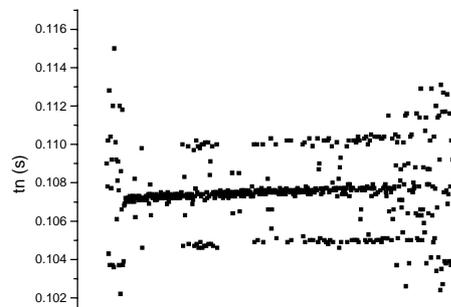


Figura 8-b: serie temporal para un flujo de 45ml/s

intervalos que no son visitados en ningún orden aparente. Entre los 25 y los 45 segundos conviven dos órbitas una regular, es decir de período 1 la cual corresponde a los 0.107 segundos y otra de período 3 la cual va desde los 0.107 segundos a 0.11 seg, luego a 0.105 seg y vuelve a 0.107seg. Entre los 50 y los 60 segundos parece que existen 5 intervalos aunque no bien definidos. A continuación se exhibe el mapa temporal correspondiente a un flujo de 48 ml/seg:

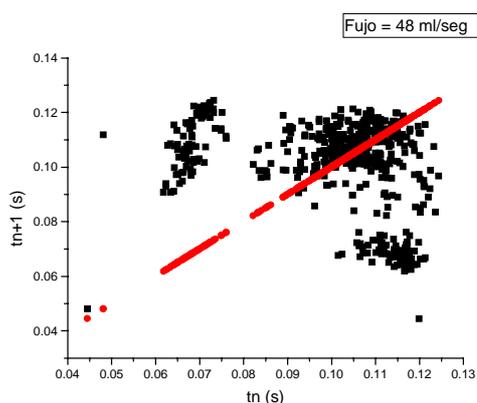
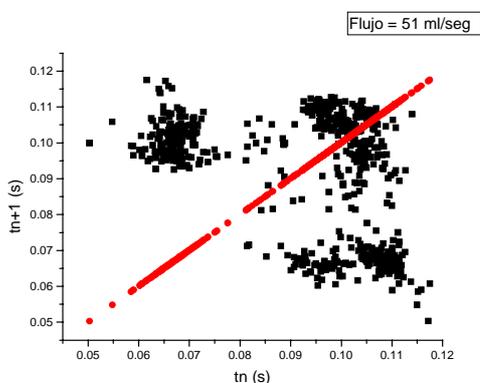


Figura 9: mapa temporal para un flujo de 48ml/seg

Otra vez se vuelve a repetir la estructura de L invertida formada por 3 cúmulos siendo más denso el situado en el vértice. También se puede observar que la figura se dispersó aún más en este caso. En la serie temporal correspondiente se observó la presencia de dos intervalos en 0.11seg y 0.07seg. La siguiente figura muestra el mapa temporal correspondiente a un flujo de 51 ml/seg:



Se observan 3 cúmulos definidos dispuestos nuevamente en forma de L invertida aunque en este caso la parte horizontal parece comenzar a curvarse y la parte vertical ensancharse. A continuación se muestra la serie temporal correspondiente:

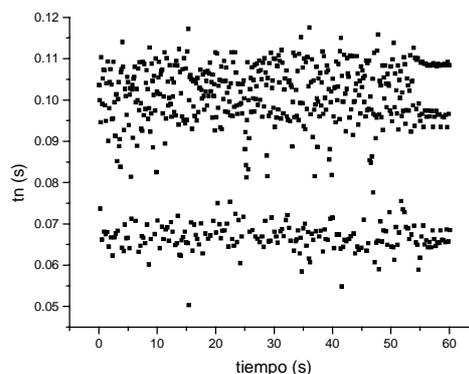


Figura 10-b: serie temporal para un flujo de 51ml/s

Hasta los 50 segundos se observan dos franjas correspondientes a intervalos en 0.10 segundos y en 0.07 seg. A partir de los 50 segundos el sistema parece evolucionar de forma tal que 3 intervalos bien definidos aparecen. Éstos son recorridos desde el menor al intermedio, al superior y de nuevo al inferior, siendo un atractor de período 3. En la figura 11-a se puede ver el mapa temporal correspondiente a un flujo de 53ml/seg:

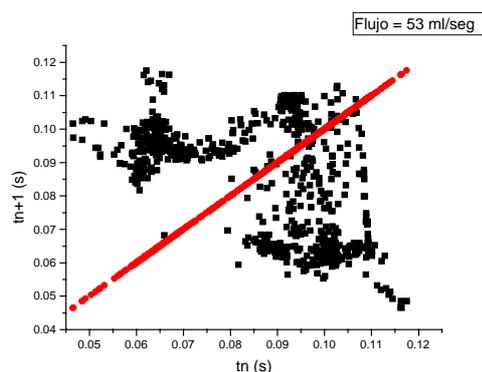


Figura 11-a: mapa temporal para un flujo de 53 ml/seg

En este caso la L invertida obtenida varias veces hasta este punto parece empezar a

distorsionarse aquí; la zona horizontal se ha curvado y la vertical ensanchado considerablemente. Los intervalos pertenecientes a esta figura son visitados sin orden alguno, formando un atractor extraño. Para visualizar esto mejor se muestra la serie temporal correspondiente:

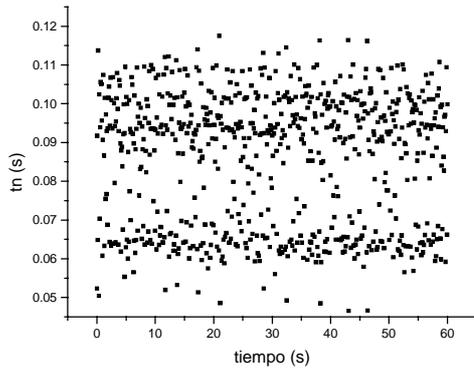
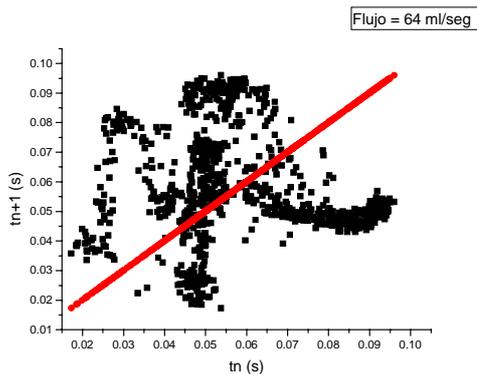


Figura 11-b: serie temporal para un flujo de 53ml/s

Si bien parece existir dos franjas predominantes, la cantidad de puntos presentes entre ellas no nos permite afirmar la existencia de sólo dos intervalos y menos aún identificar algún tipo de patrón. Es por ello que estamos en presencia de un atractor extraño.

La próxima figura muestra la serie temporal de un flujo de 64 ml/seg:



N: Figura 12:mapa Temp.. flujo = 64ml/s atractor extraño; no se ha podido definir la cantidad de intervalos presentes ni tampoco algún patrón en el que los presentes son visitados. De todas formas se puede interpretar este atractor como una evolución

del anterior si observan ambos detenidamente. Atractores de este tipo han sido encontrado en otras experiencias.^{1,2,3,4}

Las próximas 3 figuras muestran los mapas temporales de flujos comprendidos entre los 65 y los 70 ml/seg:

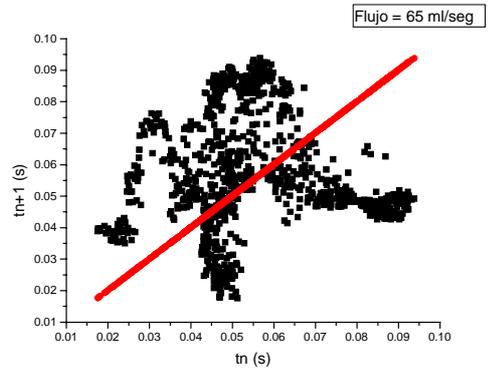


Figura 13: mapa temporal para un flujo de 65 ml/seg

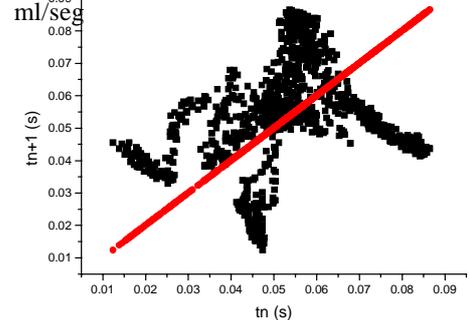


Figura 14: mapa temporal para flujo de 67ml/s

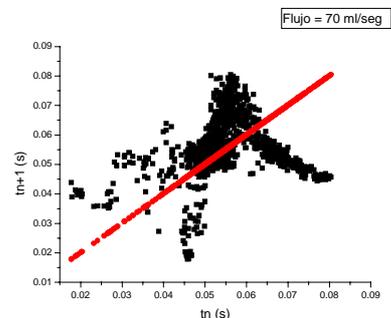


Figura 15: mapa temporal para un flujo de 70ml/seg

Las últimas tres figuras si bien poseen una estructura definida no se puede divisar en ellas un orden o patrón, estamos en presencia de atractores extraños en los cuales el comportamiento es caótico. Las series temporales para estos flujos no fueron exhibidas ya que no presentan una estructura definida siendo similares a la figura 13-b. La próxima figura corresponde al mapa temporal para un flujo de 72 ml/seg:

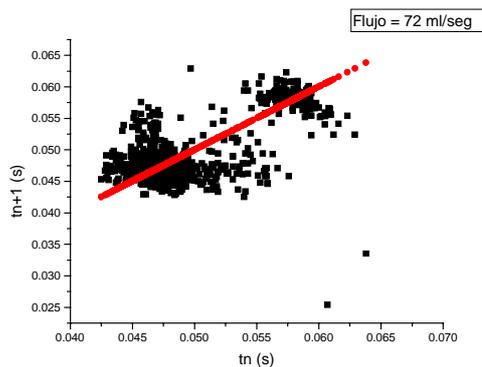


Figura 16-a: mapa temporal para flujo de 72ml/s

Para este flujo, la figura que venía evolucionando anteriormente desaparece, encontrando aquí dos cúmulos bien definidos. A continuación se muestra la serie temporal correspondiente:

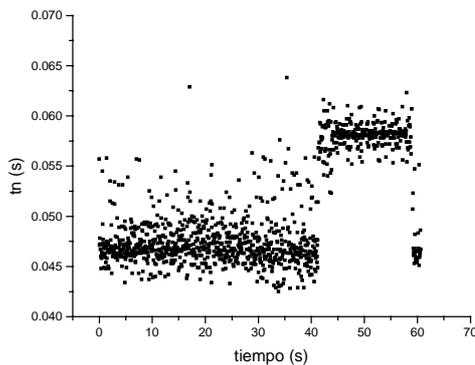


Figura 16-b: serie temporal para flujo =72ml/s

Se puede observar como durante los primeros 40 segundos sólo existe una franja, es decir

un intervalo presente. A partir de ese instante el sistema “salta” a otro intervalo. En definitiva, se tienen dos zonas de período regular, órbitas de período 1. Algún cambio violento en las condiciones del sistema tuvo que haber sido el causante de este salto. Por lo tanto los dos cúmulos presentes en la serie temporal pertenecen, uno a tiempos menores a 40 segundos y el otro a tiempos posteriores. Hasta aquí se han presentado los resultados obtenidos. Al intentar encontrar las causas de la existencia de este fenómeno se pueden proponer diversas hipótesis. Una de ellas podría ser considerar que estamos en la presencia de un régimen turbulento, hecho que provoca que el sistema sea altamente inestable. Sin embargo al calcular el número de Reynolds correspondiente a este sistema encontramos que éste es del orden de 5 lo cual es mucho menor que el correspondiente a un régimen turbulento. ⁶

Analizando las diversas hipótesis, parece ser que la única causa aparente de este comportamiento es la oscilación que se produce en la canilla al caer una gota cambiando las condiciones iniciales para la siguiente gota. Por lo tanto la forma en que una gota cae depende solamente de cómo lo ha hecho la anterior.

CONCLUSIONES

Los diversos tipos de comportamiento que presenta el sistema y que han sido expuestos en las páginas anteriores son un testimonio de la extrema complejidad que puede llegar a alcanzar la dinámica de un sistema sencillo y cotidiano como una canilla goteante. En líneas generales, se advierte que el comportamiento se hace más caótico a medida que se va aumentando el flujo; para flujos bajos el período es regular, al pasar a valores más altos se observan órbitas de período 2 y 3, y finalmente se observan atractores extraños, órbitas en las cuales es imposible discernir algún tipo de regularidad, pero en las cuales sin embargo la región visitada del espacio de fases tiene una forma definida (figuras 14a, 15, 16 y 17). Al aumentar hasta el extremo el flujo, casi en el límite de flujo continuo, se vuelve a un

período regular (figura 18b), cosa que ocurre frecuentemente en sistemas no lineales. El sistema parece ser, sin embargo, altamente inestable y sensible a la más mínima perturbación, de modo tal que dentro de un único valor nominal del parámetro de flujo pueden coexistir varias órbitas, y saltarse de unas a otras debido a variaciones aleatorias en alguno de los parámetros, comportamiento observable por ejemplo en las figuras 7c y 9b. La extrema sensibilidad del sistema se advierte también en el hecho de que un cambio muy pequeño del flujo puede dar lugar a un comportamiento completamente diferente: compárense, por ejemplo, los mapas temporales de las figuras 18 y 19a, correspondientes a flujos de 70 y 72 ml/s respectivamente.

Un análisis detallado del sistema en término de un modelo teórico del mismo a partir de los principios de la hidrodinámica queda más allá de las pretensiones de este trabajo, debido a la alta complejidad del problema. (En [1,2] se pueden encontrar diversos modelos tentativos, todos los cuales involucran grandes aproximaciones y suposiciones). Nos limitamos entonces a dejar sentado que la existencia de caos no se debe a estar en un régimen turbulento, ya que el número de Reynolds correspondiente al sistema es relativamente bajo; más bien, la atribuimos a la forma en que la caída de cada gota afecta a la siguiente a través de las oscilaciones que produce. Señalamos, por último, que el tipo de comportamiento observado en nuestro trabajo coincide, en forma cualitativa, con el informado por otros investigadores del mismo sistema [1,2,3,4].

SUGERENCIAS PARA EXPERIENCIAS FUTURAS

La pieza fundamental en el diseño del dispositivo experimental necesario para llevar a cabo esta experiencia es tanto el tubo del cual penden las gotas como la válvula utilizada. Se ha intentado llevar a cabo las mediciones con tubos de diámetro mayor al utilizado aquí sin obtener resultados satisfactorios, de todas formas resultaría interesante repetir la experiencia con otros

más finos. En nuestro caso se trabajó con tubos del orden del medio centímetro de diámetro. Por otro lado la válvula a utilizar debe permitir realizar un paso fino dentro del régimen de goteo. La utilizada aquí cumplió bastante bien su función aunque se podría intentar conseguir otra con un paso aún más fino.

En cuanto al método de adquisición de datos debemos mencionar que se ha intentado registrar las gotas con un láser, sin obtener buenos resultados. El problema con este método radica en que una pequeña ráfaga de viento o variación en la forma de goteo hace que las gotas no caigan estrictamente en línea recta, razón por la cual el sistema no las registra ya que no atraviesan el haz. Otra opción para levantar los datos sería mediante un cristal piezoeléctrico.

Los resultados obtenidos dan la sensación de ser bastante ruidosos. Lo que no se pudo discernir aquí es si ese ruido es propio del sistema o de nuestro dispositivo particular, es por ello que convendría mejorar el método de goteo como así también trabajar con otros parámetros para el diámetro del tubo, etc.

REFERENCIAS

- ¹.K.Dreyer y F.R.Hickey, "The route to chaos in a dripping mater faucet", Am.J.Phys.59 619-627, Julio 1991
- ².S.J.Rose, "Examination of the chaotic faucet", University of Illinois, diciembre de 2000
- ³.G.Austin, "Chaotic behavior in a dripping faucet revisited", mayo de 1991
- ⁴.J.M.Frogcau, "Investigating the chaotic faucet", Iniversity of Illinois, diciembre de 1998
- ⁵.N.Tufillaro, T. Abbott y J.Reilly, An experimental approach to nonlinear dynamics and chaos, 1991
- ⁶.D.J.Acheson, Elementary fluid dynamics, Oxford, (1990)