



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Facultad de Economía y Empresa

Trabajo de fin
de Máster

Bitcoin, un activo de
inversión alternativo

Rodríguez Gómez, José Luis

Martínez Filgueira, Xosé Manuel
Peón Pose, David Olegario

Máster Universitario en Banca y Finanzas
Año 2020

Trabajo de Fin de Máster presentado en la Facultad de Economía y Empresa de la Universidade da Coruña para la obtención del Máster Universitario en Banca y Finanzas (MUBF)

Resumen

El interés por las criptomonedas, especialmente Bitcoin, ha ido *in crescendo* desde su aparición en 2009. Este trabajo se centra en el estudio y análisis de esta criptomoneda como un activo alternativo de inversión especulativo con el objeto de valorar su atractivo frente a los mercados bursátiles tradicionales. A lo largo del trabajo se examinan de manera exhaustiva los rasgos definitorios de la criptomoneda y la evolución de las series de tiempo tanto de Bitcoin como del índice bursátil S&P 500 atendiendo a las variables precio, rentabilidad y volatilidad dentro del contexto económico de post-crisis entre los años 2009 y 2020. Adicionalmente, se han realizado estimaciones sobre su evolución futura empleando modelos regresivos y autorregresivos con el fin de acercarnos lo máximo posible a su desempeño próximo.

Palabras clave: Bitcoin, criptomoneda, índice S&P 500, inversión, rentabilidad, volatilidad, modelo de regresión, stock-to-flow, GARCH.

El número de palabras en el presente documento es de: 14.256

Abstract

Interest in cryptocurrencies, especially Bitcoin, has been increasing since its appearance in 2009. This project focuses on the study and analysis of this cryptocurrency as an alternative speculative investment asset in order to assess its attractiveness against traditional stock markets. Throughout the work, the defining features of the cryptocurrency and the evolution of the time series of both Bitcoin and the S&P 500 stock market index are examined exhaustively, taking into account the variables price, profitability and volatility within the post-crisis economic context between 2009 and 2020. In addition, forecasts have been made about its future performance using regressive and autoregressive models in order to get as close as possible to its next evolution.

Keywords: Bitcoin, cryptocurrency, S&P 500 index, returns, volatility, regression model, stock-to-flow, GARCH.

The number of words in this document is: 14.256

Índice

Introducción	6
1. Bitcoin y las criptomonedas	8
1.1. Anatomía de Bitcoin: los nodos y sus roles	8
1.2. Detalles sobre el funcionamiento de Bitcoin	11
1.3. Bitcoin, ¿divisa, activo, o ambas cosas?	15
1.4. El debate regulatorio sobre Bitcoin.....	17
2. El mercado bursátil y Bitcoin.....	21
2.1. Históricos de precios: Bitcoin y S&P 500.....	22
2.2. Retornos de la inversión: Bitcoin y S&P 500	24
2.3. Análisis de la volatilidad: Bitcoin y S&P 500.....	28
3. Modelización de Bitcoin	35
3.1. Modelo de regresión basado en tiempo para Bitcoin.....	35
3.2. Modelo de regresión basado en escasez para Bitcoin	38
3.3. Modelo autorregresivo de la volatilidad para Bitcoin.....	43
4. Conclusiones finales	49
Bibliografía	53

Índice de figuras

Figura 1. Roles de los nodos en la red Bitcoin.	10
Figura 2. Procesos en una transacción de la red Bitcoin.	12
Figura 3. Base e inflación monetaria anual estimada de Bitcoin.	13
Figura 4. Histórico de precios de Bitcoin e índice S&P 500 en dólares (USD).	22
Figura 5. Histórico de precios de Bitcoin en escala logarítmica e índice S&P 500.	23
Figura 6. Retorno de la inversión (ROI) diario de Bitcoin y S&P 500.	25
Figura 7. Retornos de la inversión (ROI) anuales del mercado de Bitcoin y el S&P 500.	27
Figura 8. Volatilidad diaria de Bitcoin vs S&P 500 en escala logarítmica.	29
Figura 9. Volatilidad diaria de los rendimientos de Bitcoin y el índice S&P 500.	30
Figura 10. Correlación de Pearson dinámica entre los retornos semanales de Bitcoin y S&P 500 con rango semestral (6 meses = 26 semanas)	33
Figura 11. Precios y recta de la regresión sobre series log. de precio y tiempo de Bitcoin.	37
Figura 12. Recta de regresión de las series stock-to-flow y precio de Bitcoin en escala logarítmica.	41
Figura 13. Precios y modelo exponencial Stock-to-Flow (S2F) de Bitcoin en eje de tiempo.	42
Figura 14. Volatilidad semanal real y estimada por el modelo GARCH (1,1) para Bitcoin.	46
Figura 15. Pronóstico de los retornos del modelo GARCH (1,1) y la serie real de retornos semanales de Bitcoin.	46
Figura 16. Pronóstico de los retornos semanales de Bitcoin según modelo GARCH (1,1).	47

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de características monetarias del dinero fiduciario y Bitcoin.....	16
Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los retornos semanales de Bitcoin y S&P 500 (2010-2020)	31
Tabla 3. Matriz de correlaciones de Pearson y Test-t de los retornos semanales de Bitcoin y S&P 500.	32
Tabla 4. Estadísticas de la regresión para las series log. de tiempo y precio de BTC (X^t, Y^t) ...	37
Tabla 5. Estadísticas de la regresión para las series log. stock-to-flow y precio de BTC (X^t, Y^t)	40
Tabla 6. Estadísticas del modelo de volatilidad en Bitcoin ARMA(0,0,0)+GARCH(1,1) para distribución t-Student asimétrica.....	45

Introducción

El 3 de enero de 2009, un disruptivo sistema de dinero electrónico *peer-to-peer* descentralizado veía la luz con el nombre de Bitcoin. Desde entonces, un sinfín de monedas electrónicas o criptodivisas han sido creadas con diversidad de fines, tratando de resolver o mejorar determinadas características del proyecto original: privacidad, escalabilidad, utilidad, velocidad de transacciones, etc. Al tiempo que la tecnología subyacente, *blockchain*, se ha ido integrando en diversos sectores de manera paulatina, el interés por Bitcoin ha ido *in crescendo*; sin embargo, éste último sigue siendo un activo altamente especulativo con un porvenir incierto pero prometedor como alternativa a los métodos convencionales de transferencia de valor.

La valoración de Bitcoin ha sido y es tema de controversia entre diversos académicos y analistas, catalogando su evolución de precios, en la mayoría de casos, como un claro fenómeno de burbuja. En contraparte, en los últimos años han florecido numerosos modelos que han intentado explicar el fenómeno de precios de Bitcoin asociando su valor fundamental con el grado de escasez de la criptomoneda y los costes marginales de producción basados en el consumo eléctrico.

Los aspectos tratados a lo largo del trabajo pretenden arrojar luz sobre este debate y dar respuesta a algunas cuestiones acerca de la valoración de Bitcoin: ¿qué clase de activo es?, ¿cuál ha sido su evolución histórica de precios, rentabilidad y volatilidad?, ¿cuál es el contraste de todas estas variables con las del mercado? ¿cómo se correlacionan?, ¿es atractiva la inversión en Bitcoin en términos de rentabilidad y riesgo asumidos?, ¿cuáles son las perspectivas de futuro de Bitcoin?

Para llevar a cabo el estudio y atender a todas estas cuestiones, el trabajo se ha organizado en cuatro bloques bien diferenciados, excluyendo el apartado de Introducción. El primer bloque introduce las criptodivisas, con un particular enfoque sobre Bitcoin y su funcionamiento. Adicionalmente, en este mismo apartado se realiza una revisión de la literatura académica con el fin de abordar la controversia de Bitcoin como activo, su funcionalidad, características y debate en el marco regulatorio. En el segundo bloque, se analiza el histórico de precios y el retorno de la inversión en distintos intervalos de tiempo, tanto para Bitcoin como para el mercado, atendiendo al índice

bursátil S&P 500. En el mismo bloque, continuamos el análisis centrándonos en el riesgo –entendido como volatilidad– y el grado de correlación de Bitcoin con el índice de referencia, el S&P 500 de nuevo. El eje del tercer bloque gira en torno a la modelización de precios y volatilidad de Bitcoin con el fin de estimar su evolución futura a partir de tres modelos: dos modelos regresivos para la estimación de precios, uno basado en tiempo y otro en la escasez de la criptomoneda; y un último modelo autorregresivo encaminado a la modelización de la volatilidad en el corto plazo. Por último, en el cuarto bloque se exponen las conclusiones finales, recopilando de manera breve los contenidos y resultados obtenidos a lo largo del estudio.

1. Bitcoin y las criptodivisas

Las criptodivisas actuales tienen su origen en Bitcoin, un protocolo y a su vez mecanismo financiero electrónico diseñado por un programador (o programadores) anónimo bajo el pseudónimo de Satoshi Nakamoto. La visión principal del proyecto surge con la idea de ofrecer un sistema de pagos alternativo capaz de cumplir las funciones del dinero aprovechando las posibilidades tecnológicas de la era digital (Ammous, 2018). La creación de Bitcoin introdujo un nuevo tipo de sistema financiero nunca visto hasta la fecha, de carácter descentralizado y con un régimen propio de creación y transacción de moneda respaldado por sus propios usuarios.

El sistema propuesto en Bitcoin difiere totalmente de los sistemas convencionales en cuanto a política monetaria, estableciendo un sistema en el que la creación de moneda es completamente transparente –definido por un algoritmo abierto e inalterable– facilitando la fiabilidad de las expectativas de flujo monetario circulante, en contraste con las decisiones discrecionales y circunstanciales de los bancos centrales (Gleser et al., 2014). En definitiva, Bitcoin es una propuesta de dinero electrónico con una infraestructura descentralizada y una política monetaria transparente sustentada en la tecnología *blockchain*¹. Entender su funcionamiento y sus características nos ayudará más adelante a comprender el debate sobre su regulación, así como algunos modelos propuestos para su valoración.

1.1. Anatomía de Bitcoin: los nodos y sus roles

El funcionamiento de la red de Bitcoin en su totalidad es un conjunto de procesos complejos entre los que se encuentran el registro de carteras² y generación de claves, la verificación de transacciones –y correspondiente actualización de saldos–, la creación

¹ Estructura de registro de información a través de agrupaciones llamadas bloques, vinculadas mediante criptografía que imposibilitan modificar la información del sistema. Cadena de bloques.

² Término usado para referirse a la parte del software de Bitcoin encargado de las operaciones de almacenamiento, recepción y envío de unidades monetarias Bitcoin.

de bloques o el minado³ de éstos últimos. Detrás de todos estos procedimientos subyace una infraestructura simple basada en dos figuras: los nodos y la blockchain:

- Es importante entender la **blockchain** como un libro contable mayor en el que son registradas digitalmente todas las transacciones de la red Bitcoin.
- Para esta operativa, necesita la actividad de los **nodos**, que no son más que computadoras conectadas a la red Bitcoin a través de su software, capaces de comunicarse y dar información a otras computadoras de la misma red.

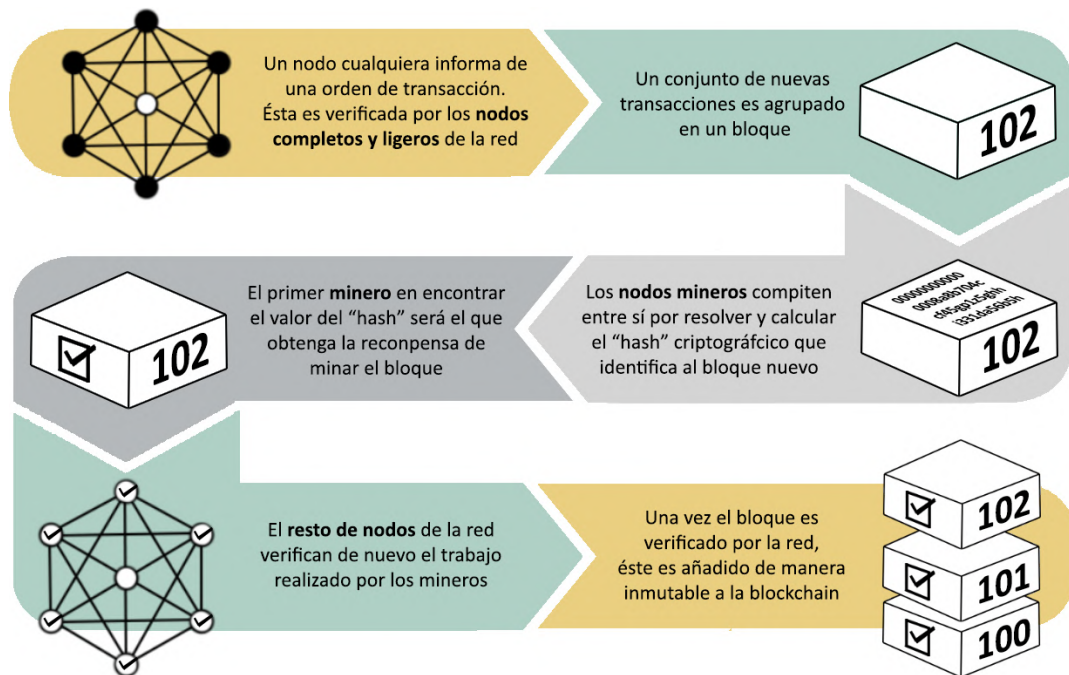
La principal función de los nodos es mantener la red segura. Para entender sus funciones, imaginemos un fichero con una serie numérica (por ejemplo “2,4,8”) que se encuentra distribuido entre miles de ordenadores interconectados –los nodos. Para poder actualizarse este fichero, los integrantes de la red deberán cumplir ciertas normas de carácter obligatorio (en este ejemplo, la serie deberá seguir una progresión geométrica de razón 2 y mantener la serie original inalterada). En el momento que uno de ellos decida modificar el fichero, todos se sincronizan para verificar que la nueva información es veraz al protocolo y no corrompe la información preexistente (una propuesta de fichero con “1,2,4,8,16” será rechazada por el sistema al alterar la información previa del fichero, a pesar de cumplir la norma relativa a la razón 2 de la evolución de la progresión). De este modo, el fichero se actualizará de manera definitiva si el cambio propuesto alcanza el consenso y aprobación de la mayoría de los integrantes de la red. En el caso de Bitcoin, los nodos almacenan una copia del historial completo de movimientos realizados desde el nacimiento de la red, contribuyendo a construir y mantener el historial de transacciones de la blockchain actualizado, veraz e inmutable.

A pesar de que los nodos dentro de la red son iguales, se distinguen varios tipos en función de las tareas y roles que desempeñan, destacando los mineros, los nodos completos y los nodos ligeros (véase Figura 1). Todos ellos participan en la red ejerciendo una serie de funciones básicas, cumpliendo otros roles más específicos dependiendo del tipo de nodo. Todos y cada uno de ellos validan y verifican transacciones, interconectándose y compartiendo la información entre ellos mismos, es decir, el conjunto de los nodos comprueba que los datos de las nuevas transacciones son correctos atendiendo a si el saldo del remitente es suficiente para realizar la

³ Proceso a través del cual determinados nodos de la red Bitcoin resuelven y validan bloques, generando la emisión de nuevas unidades monetarias Bitcoin.

transacción, si la dirección de la cartera de destino existe y si el remitente posee las claves para autorizar dicho envío. Tras verificar que la nueva transacción es válida, la información es enviada a otros nodos aleatorios de la red para realizar de nuevo el proceso y verificar la validez de la transacción para ser confirmada.

Figura 1: Roles de los nodos en la red Bitcoin.



Fuente: Elaboración propia a partir de *Bitcoin: A peer-to-peer Electronic Cash System* de Nakamoto, S. (2009).

Los nodos ligeros y los nodos completos serán los encargados principales de realizar las anteriores tareas de validación y verificación, con la diferencia de que los primeros no poseen una copia de todo el historial de transacciones, sino que albergan una copia parcial confiable –por lo que servirán de ayuda para agilizar el proceso apoyando a la red. Sin embargo, los nodos ligeros necesitarán la supervisión de los nodos completos poseedores del histórico entero de la blockchain para confirmar la transacción. Es por ello, que la confirmación final es de los nodos completos cuyo criterio prevalece por encima de los nodos ligeros, ya que rechazarán todo bloque o transacción que viole el consenso de la blockchain original completa.

Los nodos mineros son una tipología de nodos completos que no sólo verifican y validan, sino que, además, son los encargados de resolver los bloques generados

codificados con un *block hash*⁴ –que albergan las nuevas transacciones. Los mineros competirán entre ellos dedicando su capacidad de computación hasta adivinar el hash correcto del bloque de transacciones, a través de lo cual los mineros acertantes serán retribuidos en forma de unidades monetarias Bitcoin. Este proceso de minería es indispensable para la red y convierte a los mineros en una de las partes más importantes del esqueleto de Bitcoin, ya que son ellos los encargados de actualizar y transmitir a la red los nuevos bloques para su verificación y posterior introducción de manera definitiva a la blockchain.

En resumen, todos los participantes verifican y validan las transacciones que se dan en la cadena de bloques, siendo claves los nodos completos para mantener el sistema seguro y descentralizado desempeñando funciones de auditoría; mientras que son los mineros los encargados de realizar una actualización nueva inalterable de la blockchain que refleje las nuevas transacciones que se van sucediendo en la red a través del proceso de minado y posterior transmisión al resto de nodos.

1.2. Detalles sobre el funcionamiento de Bitcoin

El proceso de transacción dentro de la red Bitcoin, como se ha visto en el anterior apartado, requiere de las tareas claves de información, verificación y minado por parte de los nodos. Adicionalmente, la blockchain almacena todas las transacciones realizadas, que no son más que transferencias de saldos de unidades Bitcoin de una dirección⁵ a otra. Sin embargo, el funcionamiento de Bitcoin atiende a más procesos que únicamente el de transacciones. Estas dos tareas, verificación de transacciones y actualización de la blockchain, son el eje del sistema, pero de ellas se derivan otros procesos que es relevante atender.

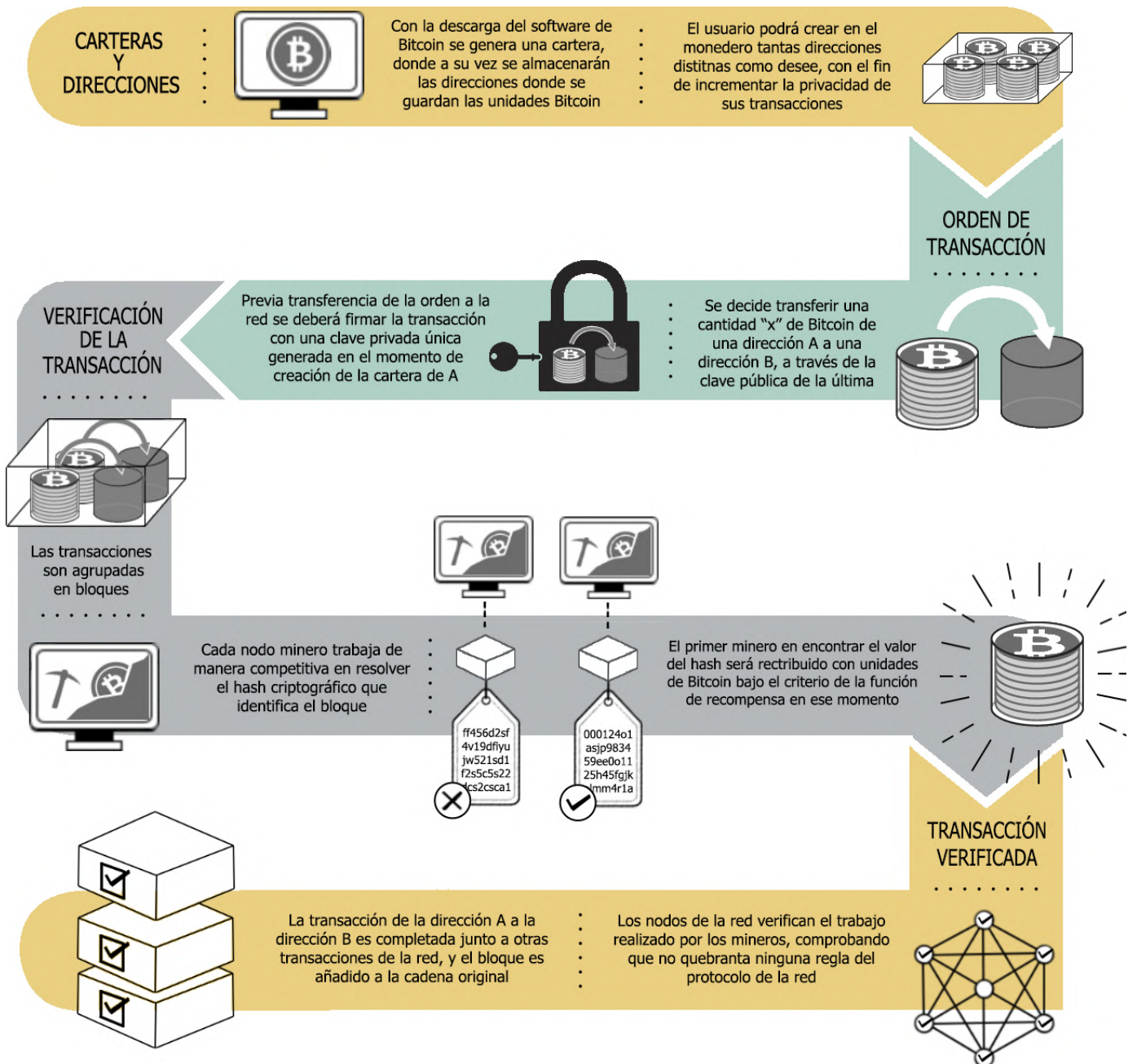
En particular, para cada usuario de la red, la posesión y propiedad de unidades Bitcoin queda reflejada en las carteras digitales, las cuales son usadas por sus titulares para realizar el seguimiento de sus saldos, así como para enviar y recibir unidades monetarias de la criptodivisa (Dwyer, 2014). La cartera de cada usuario es creada con la descarga del software de Bitcoin, por lo que cada nodo albergará siempre una cartera digital. Estas billeteras almacenan las distintas direcciones Bitcoin del titular, las cuales

⁴ Número de referencia único identificativo de un bloque de la blockchain.

⁵ Identificador alfanumérico que representa el destino de pago donde se almacenarán las unidades Bitcoin enviadas. Una cartera Bitcoin puede generar ilimitadas direcciones para recibir transacciones.

funcionan como un número de cuenta identificativo de carácter público. No obstante, para que una transacción se dé de manera satisfactoria no sólo será necesaria la dirección pública del destinatario, sino que el remitente deberá firmar dicha orden mediante sus claves privadas –generadas con la creación de la cartera– sin las cuales el sistema no aceptará la transacción (véase Figura 2).

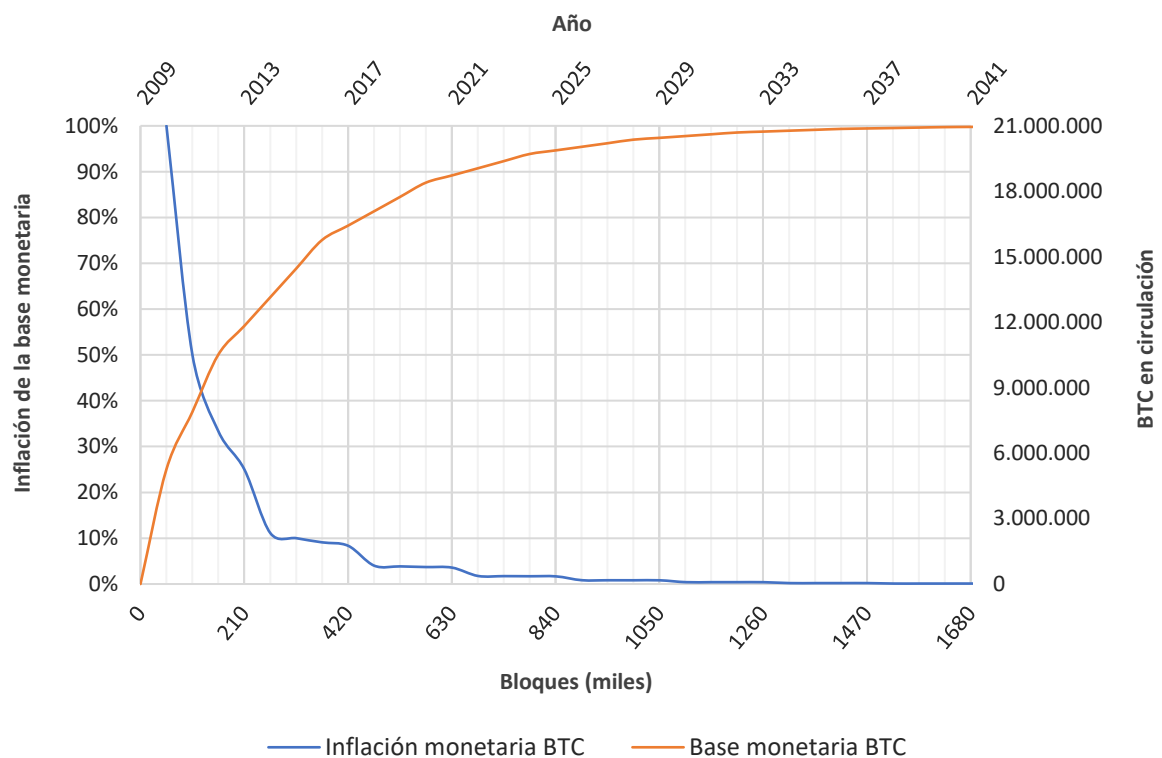
Figura 2: Procesos en una transacción de la red Bitcoin.



Fuente: Elaboración propia a partir de *Bitcoin: A cryptographic currency* de INTECO (2014) y *Bitcoin: A peer-to-peer Electronic Cash System* de Nakamoto, S. (2009).

Los nodos completos serán los encargados de dar el visto bueno a las nuevas órdenes de transacción, para agrupar automáticamente en un nuevo bloque aquellas más recientes que no forman parte de la blockchain –con una velocidad de generación de bloques nuevos cada 10 minutos, aproximadamente. La actualización de la cadena con nuevos bloques de manera fiable será una tarea subordinada exclusivamente a los mineros, quienes serán incentivados para realizar esta función mediante una retribución en unidades Bitcoin prefijada por una tasa de recompensa por bloque minado.

Figura 3: Base e inflación monetaria anual estimada de Bitcoin.



Fuente: Elaboración propia.

Esta gratificación en forma de honorarios añade un incentivo a los nodos mineros para soportar la red, y proporciona una forma de poner las monedas en circulación, dado que no hay autoridad central que las distribuya (Nakamoto, 2009). El proceso de recompensa a través del cual se remunera a los mineros por los servicios ofrecidos a la red es a la misma vez el proceso de producción de Bitcoin, ya que las unidades otorgadas a los mineros por cada bloque minado son de nueva creación. Este suministro de Bitcoin está establecido siguiendo una función geométrica de tendencia decreciente, a través de la cual la recompensa se reduce un 50% cada 210.000 bloques, equivalente

de manera aproximada a 4 años manteniendo el ritmo promedio actual de minado en el tiempo. A raíz de este peculiar sistema de emisión de moneda, la inflación de la base monetaria en la criptomoneda será un dato estimable decreciente en el tiempo, dado que su tasa de creación de nuevas unidades Bitcoin por bloque minado es un dato conocido y también decreciente (véase Figura 3). Además, la oferta total de Bitcoin en circulación se encuentra limitada con un techo: un suministro finito de 21 millones de unidades a partir de las cuales no será posible producir más.

El evento en el que se reducen a la mitad los honorarios derivados de las labores de minado es conocido como *halving*. Cuando Bitcoin vio la luz por primera vez en 2009, la recompensa era de 50 unidades por bloque, cantidad que se vio reducida a 25 unidades en el 2012 con el primer halving, y posteriormente a 12,5 unidades en 2016 con el segundo. El tercer y más reciente halving ha tenido lugar en 2020, reduciendo de nuevo a la mitad las retribuciones por bloque minado –y por ende la tasa de producción de Bitcoins– hasta las 6,25 unidades.

A todo esto, se le añade el reajuste de la dificultad para resolver los hashes criptográficos, ya que para garantizar el buen funcionamiento de la red se estableció la producción de un bloque cada 10 minutos. Tiempo aproximado en el que los mineros deberían obtener la solución para confirmar el bloque y consecuentemente las transacciones en él. Sin embargo, si la capacidad de computación de los mineros se incrementa –inherente al avance tecnológico, reflejado en la Ley de Moore⁶– y resuelven el hash en menor tiempo del esperado, el software de Bitcoin reajustará la dificultad⁷ del hash acorde a las capacidades de los mineros, complicando su labor mediante un incremento de la dificultad de sus hashes con el fin de mantener la producción de bloques a un ritmo estable a pesar de los avances tecnológicos.

En síntesis, Bitcoin cuenta con una gran cantidad de procesos que funcionan en sinergia de manera exitosa para culminar con su función original: la transacción de valor sin intermediarios en una red descentralizada. Los detalles técnicos detrás de la infraestructura de Bitcoin están pensados concienzudamente para cumplir el protocolo programado de la red, velando así por su inmutabilidad, seguridad y funcionalidad. Con

⁶ Ley definida por Gordon Moore, en la que se pone de manifiesto que cada dos años grosso modo, se duplica la capacidad de cómputo al duplicarse el número de transistores en un microprocesador.

⁷ Bitcoin está diseñado para evaluar y ajustar la dificultad de minado cada 2.016 bloques, o cada dos semanas aproximadamente si se mantiene un ritmo estable de minado de un bloque cada 10 minutos.

todo, el funcionamiento de Bitcoin requiere de un coste energético cada vez mayor a medida que la red se incrementa, siendo su consumo anual estimado de 56,59 Twh⁸ para este año 2020; unas cantidades desorbitadas que compiten con los gastos energéticos anuales de países como Suiza, República Checa o Portugal.

1.3. Bitcoin, ¿divisa, activo, o ambas cosas?

Bitcoin, desde su nacimiento, se presentó como un sistema alternativo eficiente de transferencia de valor. Sin embargo, se ha hablado mucho sobre su definición y todavía hoy en día existe discrepancia sobre si Bitcoin es una divisa, un activo, una materia prima o todas estas etiquetas al mismo tiempo; controversia causada en parte por la ausencia de un concepto que englobe por completo las peculiaridades de la criptomoneda. Con el fin de catalogar Bitcoin, atenderemos en las siguientes líneas al debate y razonamientos de diversos autores y organismos legales que motivan a clasificarlo de una manera u otra partiendo de sus características objetivas inherentes.

Numerosos autores son los que defienden a Bitcoin como una neodivisa. Y es que la criptomoneda Bitcoin surge con la idea de cumplir de manera exitosa las tres funciones relevantes del dinero a lo largo de la historia: (i) Servir como método de intercambio en acuerdos comerciales en la economía real; (ii) permitir el ahorro y cumplir funciones de reserva de valor y (iii) servir como unidad de cuenta, permitiendo medir el valor de bienes y servicios.

En efecto, Bitcoin funciona como un verdadero sistema de pago a través del cual sus usuarios pueden transferir valor y comprar o vender bienes y servicios a nivel global sin ningún tipo de frontera ni restricción (Kaplanov, 2012). Bitcoin puede ser enviado a cualquier zona del mundo en cuestión de minutos, con unos costes por transacción muy inferiores a las de las alternativas fiduciarias digitales –transferencias nacionales, internacionales, SEPA, Paypal, etc.– convirtiéndolo en un buen candidato para convertirse en un medio de pago aceptado por la sociedad (Stroukal, 2018). Organismos monetarios como el Banco Central Europeo se han posicionado al respecto en numerosas ocasiones, catalogando a Bitcoin como una divisa virtual⁹ no regulada.

⁸ Estimación generada por la Cambridge Centre of Alternative Finance (<https://www.cbeci.org/>)

⁹ Una divisa virtual es definida por el Banco Central Europeo como una forma de dinero digital no regulado, no emitido ni garantizado por un banco central y que puede actuar como medio de pago.

En resumen, Bitcoin posee las características necesarias para funcionar como moneda (véase Tabla 1), ofreciendo ventajas competitivas convincentes frente a las modernas divisas fiduciarias (Graf, 2013). Sin embargo, una divisa descentralizada y no soberana plantea numerosos problemas fiscales –como el cobro de impuestos– y de control por parte de los organismos legales, sin dejar de lado las repercusiones en temática de desprotección de los usuarios al no poder intervenir de ningún modo sobre las transacciones y los fondos movidos ilícitamente o robados.

Tabla 1: Comparación de características monetarias del dinero fiduciario y Bitcoin.

Características	Dinero fiduciario	Bitcoin
Reconocido (Aceptado)	Alto	Moderado
Fungibilidad (Intercambiable)	Alto	Alto
Durabilidad	Moderado	Alto
Portabilidad	Alto	Alto
Divisibilidad	Alto	Alto
Seguridad (Infalsificable)	Moderado	Alto
Fácil transaccionalidad	Alto	Alto
Escasez (Suministro limitado)	Bajo	Alto
Descentralizado	Bajo	Alto
Estabilidad en valor	Alto	Bajo
Soberano (Emitido por Gobierno)	Alto	Bajo

Fuente: Elaboración propia atendiendo a cualidades del dinero mencionadas en *The Quality of Money* de Bagus, P. (2009) y *The Origins of Bitcoin: Stages of Monetary Evolution* de Graf, K. S. (2013)

Adicionalmente, su supuesta adopción generaría una ruptura con los modelos monetaristas y políticas monetarias modernas llevadas a cabo por las distintas autoridades centrales. Se suprimiría la posibilidad de implementar políticas de estímulo económico a través de la gestión de la oferta monetaria con las correspondientes repercusiones sobre el control de la inflación, introduciendo a los actuales modelos en un nuevo paradigma nunca visto. Por lo tanto, parece lógico suponer que el éxito de Bitcoin como divisa dependa en gran parte de la voluntad de los Estados en la aplicación de principios neutrales en sus leyes a una innovación que puede llegar a ser una amenaza para uno de los mayores poderes del Estado: su capacidad de imprimir dinero fiduciario (McGinnis, 2020).

Por otro lado, no son pocos los autores que catalogan a Bitcoin como una posesión, un activo cuyo precio se construye a base de las expectativas futuras derivadas de su innovación tecnológica y crecientes costes de producción. Su razonamiento es fundado en que, de manera muy mayoritaria, el interés de sus usuarios e inversores no es la usabilidad de la criptomoneda como divisa, sino como activo de

inversión alternativo, altamente volátil y especulativo (Glaser et al., 2014). El paso del tiempo y la efervescente demanda de la criptomoneda como vehículo de inversión han ido asentando la idea de Bitcoin como activo, específicamente como materia prima o *commodity* virtual dadas las peculiaridades de su producción, siendo reconocido como tal por la Commodity Futures Trading Commission (CFTC) en Estados Unidos, por la Canada Revenue Agency (CRA) en Canadá o por la Comisión Reguladora Bancaria de China, por poner algunos ejemplos.

De manera complementaria, son numerosos los análisis que han sacado a relucir la habilidad y eficacia de las criptomonedas, especialmente Bitcoin, como valor refugio¹⁰ derivado en gran medida de su desacoplamiento del resto de activos financieros convencionales y de una menor dependencia de las variables económicas tradicionales, convirtiendo a Bitcoin en un activo a tener en cuenta por varios inversores en el proceso de diversificación (Shahzad et al., 2019).

En definitiva, atendiendo a las características intrínsecas y de producción de Bitcoin, la criptomoneda parece compartir similitudes con el dinero fiduciario y con materias primas (p. ej. el oro), convirtiéndose en cierta manera en un híbrido entre ambos, una especie de materia prima sintética con funciones monetarias (Selgin, 2015).

1.4. El debate regulatorio sobre Bitcoin

Actualmente existen tres temáticas que conciernen a Bitcoin que son objeto de interés y debate en todo el mundo, colocando a la criptomoneda en el foco de atención de numerosos países y gobiernos. A saber, el desafío regulatorio dada su complicada rastreabilidad, la inmadura regulación fiscal que lo rodea y el vacío legal respecto a la minería de criptomonedas como actividad económica. Las debatimos brevemente a continuación.

En primer lugar, la privacidad y anonimato brindado por la red se han convertido en un desafío regulatorio considerable. A pesar de que Bitcoin cuenta con grandes potenciales beneficios como alternativa de pago, el anonimato de sus transacciones ha permitido a numerosos usuarios malemployar la red con fines delictivos como el tráfico de drogas, armas, blanqueo de capitales y evasión fiscal, entre otras actividades ilícitas

¹⁰ Se considera como valor refugio a aquellos activos cuyo valor se mantiene estable a pesar de turbulencias y estrés económico derivado de una correlación baja o negativa con el resto de mercados.

(Foley et al., 2019). El dinero efectivo es el que hasta la fecha ha jugado un papel más importante en facilitar esta clase de actividades, siendo en gran medida anónimo y difícilmente rastreable. Sin embargo, permitiendo la transaccionalidad de valor a distancia, Bitcoin ha facilitado el crecimiento de los mercados ilegales en línea a través de la *darknet*, convirtiendo a la criptomoneda en un vehículo de pago interesante para determinados usuarios en el desarrollo de actividades delictivas y de comercio de mercancías ilegales. Las estimaciones más recientes sugieren que en torno al 46% de transacciones en Bitcoin –con un valor estimado de 76 mil millones de dólares– proceden de todo tipo de actividades ilegales; cifras que se acercan a la escala de los mercados ilegales de drogas en todo Estados Unidos o Europa (Foley et al., 2018).

Las unidades Bitcoin no pueden ser rastreadas por terceros, ya que la información que brinda la red –claves públicas, cantidades transferidas, entre otros– es insuficiente para obtener la identidad adjunta a estos datos, haciendo que los sujetos involucrados en las actividades ilícitas y el tráfico de mercancías ilegales sean invisibles para las autoridades fiscales. Con el fin de combatir los riesgos relacionados con ese anonimato, en Europa, la Directiva (UE) 2018/843 actualizó la normativa relativa a la prevención del uso del sistema financiero para el blanqueo de capitales o la financiación del terrorismo incluyendo a los proveedores de servicios de cambio de monedas virtuales por monedas fiduciarias –también conocidos como *cryptoexchanges*– y a los proveedores de servicios de custodia de monederos electrónicos como sujetos obligados. Bajo este nuevo marco regulatorio, las entidades estrechamente relacionadas con Bitcoin y otras criptomonedas deberán, en cualquier caso, cumplir con las obligaciones de información pertinentes, así como con las medidas de diligencia debida de acuerdo con la legislación vigente a fin de cooperar con los organismos de supervisión y otras autoridades competentes en la lucha contra el blanqueo de capitales y financiación del terrorismo.

Ante la importancia de la problemática y la relevancia de los *cryptoexchanges* en el funcionamiento del criptomercado, el marco regulatorio en todo el mundo – Australia, Estados Unidos, China, Japón, entre otros– ha estado actualizándose al respecto con medidas similares relacionadas con mayores exigencias de prácticas de seguridad, transparencia y cooperación con los organismos correspondientes en la prevención del lavado de dinero y financiación del terrorismo.

En segundo lugar, la regulación fiscal e impositiva del uso, tenencia y compraventa de criptomonedas ha sido un tema de controversia y debate que se mantiene aún a día de hoy dadas sus implicaciones económicas y financieras para los gobiernos, así como para los inversores (Charfeddine et al., 2018). La determinación de unas regulaciones u otras depende estrechamente de la clasificación de Bitcoin y su naturaleza por parte de los gobiernos –como divisa, materia prima o valor cotizado–, siendo bastante unánime y extendida la decisión de tratarlo a efectos fiscales e impositivos como una mercancía o una materia prima al no ser considerado como moneda de curso legal bajo ninguna jurisdicción (Blundell-Wignall, 2014).

Estados Unidos, Canadá, China, Japón y varios países de Europa, entre ellos España, han manifestado su posición al respecto, estableciendo la obligación de declarar cualquier ganancia o pérdida derivada de la compraventa de criptomonedas con fines especulativos o de su uso como medio de pago¹¹. Las plusvalías serán catalogadas como ganancia patrimonial o de capital para el contribuyente, de manera similar a como lo hacen los activos de capital (acciones, bonos, materias primas, etc.), con la posibilidad de imputar pérdidas y resultados negativos en los plazos y condiciones estipuladas por ley, sin perjuicio de las salvedades correspondientes a cada legislación. Adicionalmente, la mera tenencia o posesión de criptomonedas no tiene implicaciones a efectos patrimoniales, ni obligaciones de declaración en ninguno de los ámbitos regulatorios comentados, pero sí su uso y compraventa como se ha especificado anteriormente.

En tercer y último lugar, parece haber cierto vacío legal respecto a la minería de Bitcoin y otras criptomonedas. La actividad no está contemplada bajo ninguna jurisdicción por lo que su desarrollo no se encuentra limitado ni restringido legalmente en ningún país, aunque, algunos territorios, como China, han intentado desalentar su desempeño.

Sin embargo, la ausencia de regulación de la minería de criptomonedas no exime al contribuyente del cumplimiento de las obligaciones tributarias en el desarrollo de esta actividad como un negocio empresarial. De hecho, a la espera de una actualización normativa en varios países, el minado de criptomonedas es considerado a efectos

¹¹ En esta casuística, China muestra una regulación más restrictiva que otros países, estando prohibida la circulación de criptomonedas como método de pago alternativo al de su divisa oficial, el Renminbi (RMB), según las circulares de 2013 y 2017 publicadas por el Banco Popular de China.

fiscales en todas las jurisdicciones como una actividad económica más –con sus correspondientes gastos e ingresos–, al obtenerse rendimientos recurrentes derivados de la producción (minado) de criptomonedas. En cualquier caso, las legislaciones tributarias deberán ajustarse lo antes posible para incorporar esta nueva actividad en los sistemas de impuestos directos e indirectos (The World Bank, 2018).

2. El mercado bursátil y Bitcoin

El presente apartado nace con el objetivo de ahondar en la evolución de las cotizaciones de la criptomoneda a lo largo de sus primeros 11 años de vida tomando como referencia la evolución en los mercados convencionales. Para llevar a cabo esta tarea se analizará la evolución del histórico de precios de Bitcoin y su rentabilidad atendiendo a distintos intervalos de tiempo. El mismo análisis y mecánica serán empleados sobre el índice S&P 500, con la finalidad de analizar y contrastar la evolución y resultados obtenidos por la criptomoneda con el desempeño del principal mercado de acciones cotizadas de Estados Unidos. Posteriormente, a partir de la serie de retornos diarios de Bitcoin y el índice S&P 500, se realizará un análisis de la volatilidad enfocado al cálculo de la ratio riesgo-beneficio para cada mercado. Los resultados se acompañarán de otros indicadores descriptivos, así como de un análisis de la correlación entre ambos mercados.

Las cotizaciones de Bitcoin empleadas como base para llevar a cabo el estudio y análisis son tomadas de Quandl¹² empleando un histórico de precios que bebe de la información de precios de mercado facilitada por *blockchain.com* atendiendo a una consolidación de las cotizaciones diarias en dólares (USD) de Bitcoin en los principales *cryptoexchanges* del mercado. El rango y horizonte temporal del histórico de precios empleado va desde el momento en que Bitcoin vio la luz, el 3 de enero de 2009, hasta el 3 de febrero de 2020, fecha de recopilación de datos para el presente trabajo.

En lo que respecta al S&P 500, sus cotizaciones diarias han sido extraídos del histórico de precios presentado por el Wall Street Journal¹³ atendiendo a los precios de cierre del mercado. El rango y horizonte temporal empleados será el mismo que el tomado para el histórico de precios de Bitcoin, a fin de obtener unos resultados comparables gráfica y estadísticamente.

¹² <https://www.quandl.com/data/BCHAIN/MKPRU-Bitcoin-Market-Price-USD>

¹³ <https://www.wsj.com/market-data/quotes/index/SPX/historical-prices>

2.1. Históricos de precios: Bitcoin y S&P 500

La evolución de las cotizaciones tanto de Bitcoin como del índice S&P 500 a lo largo del período analizado coinciden con un contexto de recuperación económica a escala global tras los derrumbes de las bolsas de valores de todo el mundo vividos durante la crisis financiera de 2008. Tomando esto en cuenta, ambos mercados reflejan una senda de crecimiento marcada por la evolución alcista de los precios (véase Figura 4), siendo más acusada en Bitcoin, pero con unos precios mucho más inestables y volátiles, poniendo de manifiesto la madurez de un mercado y otro.

La evolución del histórico de precios de Bitcoin es un tema insólito, a la par que polémico. Con un valor inicial de cero, y de \$0,08 en sus primeras cotizaciones oficiales en Mt.Gox¹⁴, Bitcoin ha llegado a alcanzar cifras superiores a los \$19.000 en el año 2017, situándose a fecha 3 de febrero de 2020 en los \$9.378 por unidad. Por el otro lado, el índice S&P 500 ha seguido una senda de crecimiento continuado en sinergia con otras bolsas del mundo, marcado por la recuperación de los mercados tras la Gran Recesión, pasando de los 900 puntos a comienzos de 2009 hasta los más de 3.200 puntos a 3 de febrero de 2020.

Figura 4: Histórico de precios de Bitcoin e índice S&P 500 en dólares (USD).

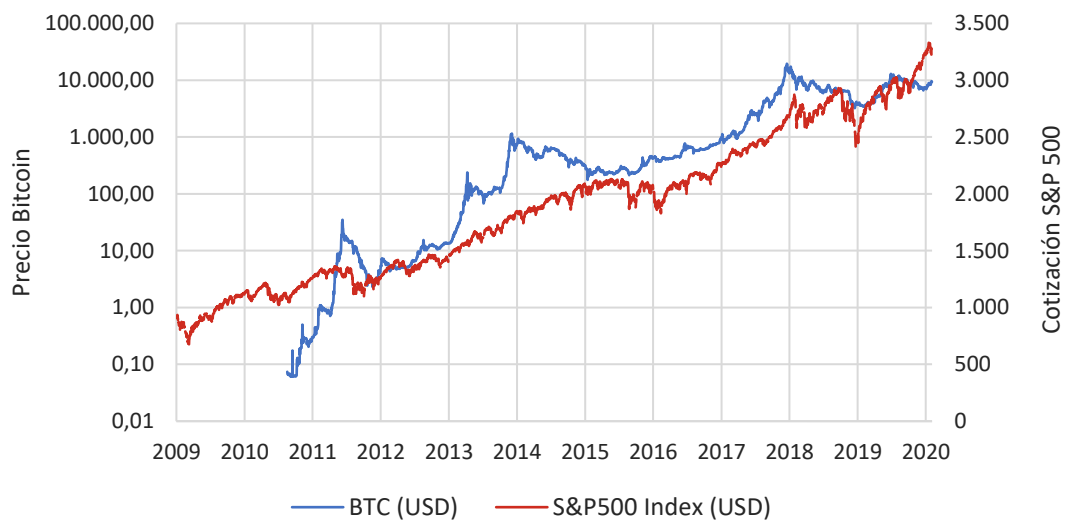


Fuente: Elaboración propia.

¹⁴ *Crypto exchange* consolidado como el mayor intermediario de Bitcoin y la principal entidad intercambiaría de Bitcoin en el mundo durante los años 2010 y 2014.

A diferencia del S&P 500, conformado por los 500 principales valores estadounidenses en capitalización bursátil, Bitcoin no tiene un valor subyacente. Su valor se basa en la oferta y la demanda, o, dicho de otro modo, lo que la gente está dispuesta a pagar por él (Kaplanov, 2012). La especulación ha sido uno de los motores de su escalada en precios hasta el día de hoy, viviendo a lo largo de su corta vida meteóricos incrementos de precio seguidos por bruscas caídas. A partir de estos hechos, Bitcoin ha sido catalogado en numerosas ocasiones como un fenómeno de burbuja por sus similitudes con la tulipomanía¹⁵.

Figura 5: Histórico de precios de Bitcoin en escala logarítmica e índice S&P 500.



Fuente: Elaboración propia.

No obstante, lejos de caer en el olvido, tras cada etapa de euforia y desplome, Bitcoin ha consolidado su cotización en un rango de precios más o menos estable superior al del anterior ciclo. El precio de Bitcoin, a pesar de ser altamente volátil y estar frecuentemente inmiscuido en bruscas caídas, ha tenido el potencial para recuperarse de los desplomes en tiempos récord permitiendo que el precio crezca a niveles cada vez más altos una y otra vez durante los últimos años (Gerlach et al., 2019). Esta peculiaridad se observa mejor gráficamente atendiendo a una escala logarítmica en base 10 en el eje de precios de Bitcoin (véase Figura 5). Ambos mercados muestran en

¹⁵ Considerado el primer fenómeno especulativo de masas, relacionado con el comercio de bulbos de tulipán y su desorbitada alza de precios en Países Bajos durante el siglo XVII.

términos largoplacistas una trayectoria bastante pareja en cuanto a períodos al alza y a la baja, manteniéndose en ambos casos una macrotendencia de pendiente positiva.

En los últimos años, hemos asistido a un crecimiento inaudito del mercado de valores estadounidense. Entre sus principales índices, el S&P 500, ha mostrado a su vez un crecimiento considerable en el número de acciones tecnológicas entre sus filas, llegando a representar actualmente un 26,2% del total. Bajo este contexto económico y tecnológico favorable y amigable con las nuevas tecnologías, Bitcoin ha encontrado su sitio como alternativa de inversión especulativa. Pendiente queda ver si la evolución de la criptomoneda es capaz de desacoplarse de la de los mercados tradicionales en un contexto económico hipotético menos favorable en el futuro.

2.2. Retornos de la inversión: Bitcoin y S&P 500

Los resultados obtenidos en Bitcoin y S&P 500 desde el punto de vista de la inversión serán analizados a lo largo de este apartado atendiendo a los retornos de la inversión. El cálculo de la rentabilidad de la inversión (ROI) no será estático, sino que obedecerá a una evolución en el tiempo, atendiendo a los precios diarios p de cada mercado con el fin de obtener una serie de rentabilidades dinámica, representable gráficamente. Para un momento t y un intervalo de tiempo predefinido Δt , el retorno de la inversión estará determinado por:

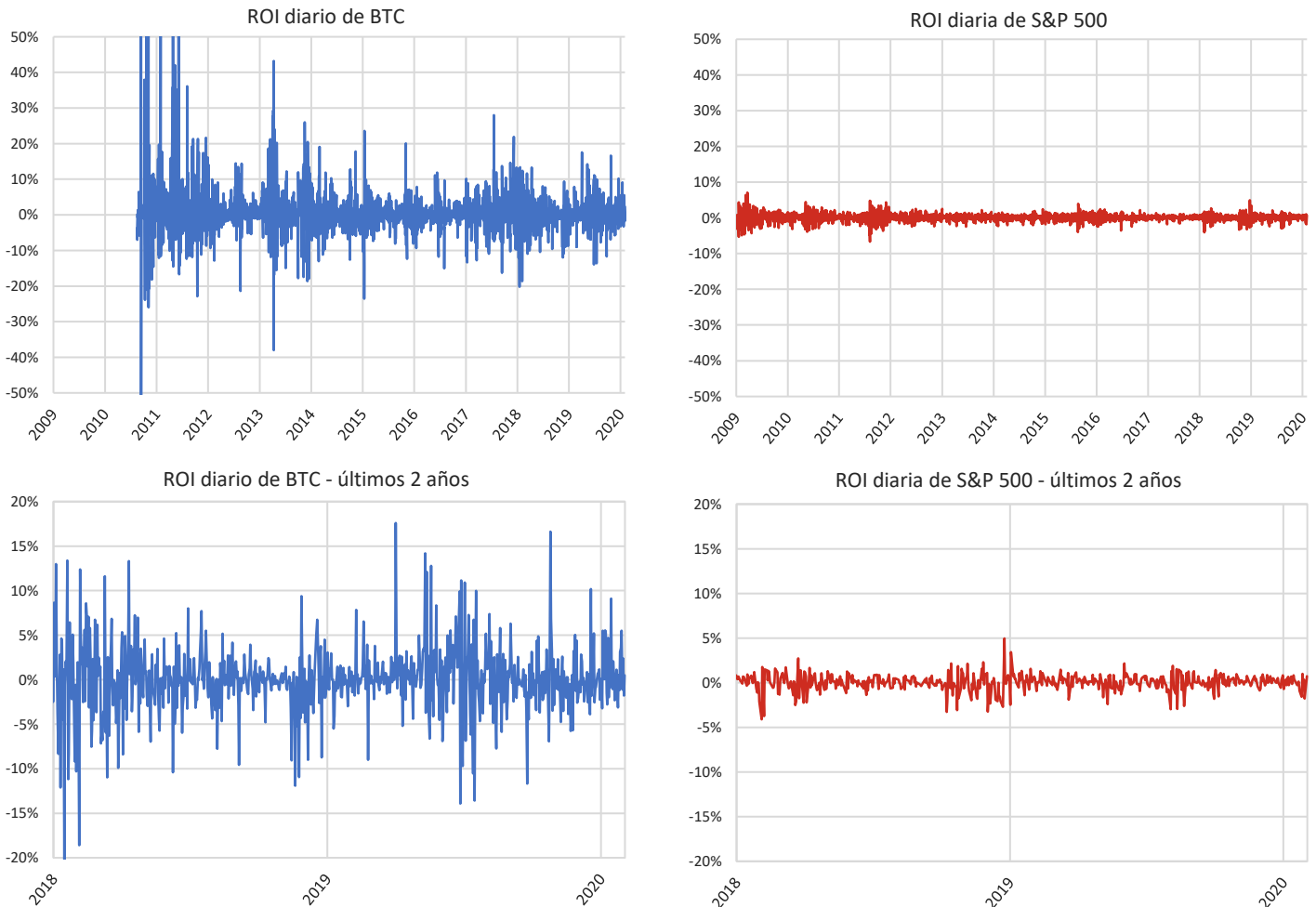
$$r(t, \Delta t) = \frac{p(t + \Delta t) - p(t)}{p(t)}$$

Observada la evolución de precios de Bitcoin y S&P 500, está claro que el criptoactivo mostrará unos resultados mucho más abultados que los del índice de mercado, fruto del carácter especulativo del primero. En cualquier caso, será interesante atender a las peculiaridades de las rentabilidades de uno y otro en distintos intervalos de tiempo y los rangos entre los que oscilan los retornos con el fin de analizar en ulteriores apartados su relación entre rentabilidad y volatilidad.

A pesar del explosivo incremento de valor de Bitcoin en 2017, las rentabilidades obtenidas durante este período podrían catalogarse de normales comparadas con las de años atrás. La serie de retornos diarios para Bitcoin (Véase Figura 6) muestra unos resultados diarios desmesurados en los primeros compases de su cotización. Estas grandes oscilaciones de rentabilidad se repetirán –aunque en menor escala– de manera

reiterada a lo largo de todo el período analizado, coincidiendo con puntos clave de las cinco grandes burbujas especulativas¹⁶ vividas hasta la fecha en el criptoactivo (Huber & Sornette, 2019).

Figura 6: Retorno de la inversión (ROI) diario de Bitcoin y S&P 500.



Fuente: Elaboración propia.

Las rentabilidades diarias en Bitcoin ponen de manifiesto su carácter altamente especulativo si las comparamos con las del índice bursátil. Los movimientos de rentabilidad de la criptomoneda son extremadamente bruscos, ya que incluso en intervalos de tiempo tan reducidos como el diario han llegado a tocar rendimientos de -64,62% en negativo y los +173,01% al alza motivados por los fuertes vaivenes

¹⁶ A saber, una primera gran burbuja en 2011, entre el 14 de abril y el 9 de junio; una segunda burbuja en 2012, entre el 10 de mayo y el 15 de agosto; una tercera situada entre el 3 de enero y el 9 de abril de 2013; una cuarta en el mismo año que la anterior, del 7 de octubre al 4 de diciembre; y la quinta y más reciente, en 2017, del 25 de marzo al 17 de diciembre según los análisis de precios presentados por Gerlach et al. (2019) y Huber & Sornette (2019).

especulativos sobre el precio de la criptomoneda. No obstante, esta fotografía perteneciente a los primeros compases de la cotización de Bitcoin, poco se parece a la realidad de los rendimientos de la criptomoneda hoy día, con unas cifras aún elevadas –con valores superiores al $\pm 5\%$ en la práctica totalidad de las oscilaciones de rendimientos intradiarios– pero muy alejadas de los vertiginosos números de antaño. En cierto modo, el mercado de Bitcoin, a medida que madura, parece mostrar una tendencia hacia una mayor estabilización de los precios y sus rendimientos, mucho más acordes a los movimientos esperados en mercados tradicionales como el S&P 500. Sin embargo, las noticias, las regulaciones y la incerteza sobre su futuro se convierten en impulsores del precio al alza o a la baja, haciendo que el interés sobre ella medre o mengüe de manera dramática. Como resultado, en episodios de crecimiento explosivo de precios, el creciente interés eleva los precios aún más, mientras que, durante los rápidos descensos de precios, el pánico y la incertidumbre empujan los precios aún más abajo (Kristoufek, 2015).

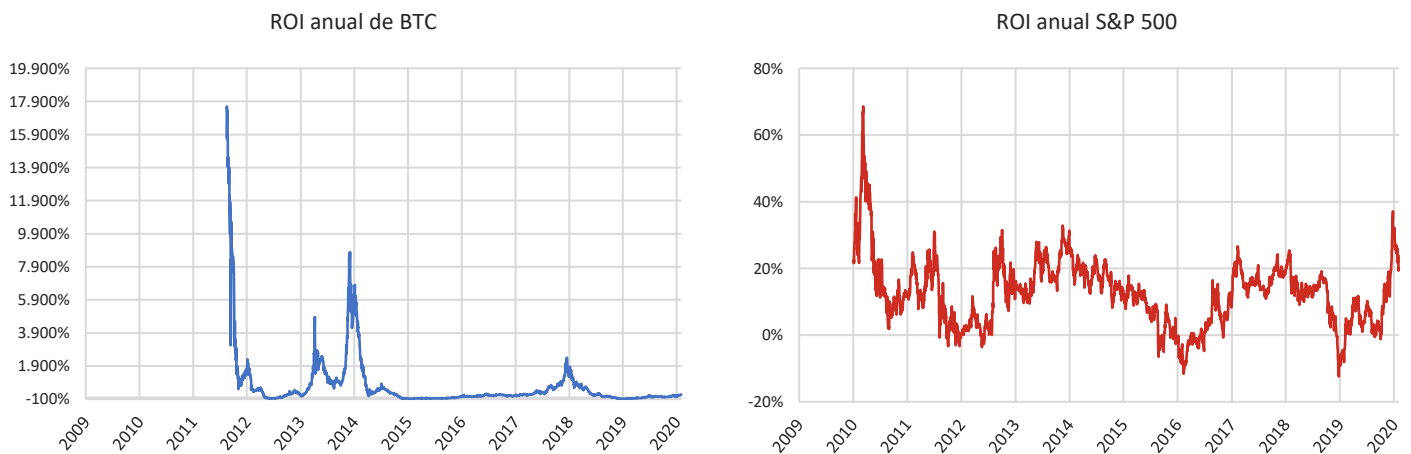
El índice, por su parte, mantiene una evolución menos tormentosa (Véase Figura 6). Sus rendimientos se mantienen en un rango que en contadas ocasiones supera el $\pm 3\%$, con un máximo de $+7,07\%$ alcanzado a fecha 23 de marzo de 2009, momento en el que el mercado bursátil parecía haber tocado suelo días antes y comenzaba a vislumbrarse un atisbo de recuperación; y un mínimo de $-6,66\%$ durante el *Black Monday* del 8 de agosto de 2011, marcado por un contexto de preocupación ante posibles contagios de la crisis de deuda en Europa y las noticias de la rebaja de la calificación crediticia de los Estados Unidos. La evolución de los rendimientos del principal índice estadounidense, el S&P 500, reflejan su clara dependencia del contexto económico global, generando resultados negativos más pronunciados en los momentos de incertidumbre económica, y resultados positivos más exagerados en etapas de recuperación económica precedidas por crisis financieras o bruscas caídas del mercado.

Atendiendo a los retornos de la inversión anuales¹⁷, los resultados vuelven a poner de manifiesto las diferencias entre un mercado y otro, reflejando de nuevo el carácter especulativo y volátil de Bitcoin incluso en horizontes temporales más amplios (véase Figura 7). Los retornos de la inversión anuales en Bitcoin en sus etapas más

¹⁷ Rentabilidad obtenida de la diferencia procedente de un precio de adquisición p en el momento t , y su precio de venta p' en el momento a $t+365$.

prematuras se elevan a cifras estratosféricas superiores al 10.000% coincidentes con entradas al mercado en sus primeras cotizaciones en 2010 y su posterior venta en zonas cercanas al pico de precio vivido a mediados de 2011 –primera gran burbuja de Bitcoin. Los resultados vuelven a ser astronómicos a lo largo de 2013, año en el que la criptomoneda volvió a vivir un nuevo boom en sus precios pasando de los \$13 el 12 de abril de 2013 a \$1.151 en la misma fecha del 2014 (+8.777%). Del mismo modo, en 2017, la criptomoneda vivió una nueva aceleración anormal de precios elevándose desde los \$781,56 el 17 de diciembre de 2016 hasta los \$19.499 un año después, generando un retorno de +2.394%.

Figura 7: Retornos de la inversión (ROI) anuales del mercado de Bitcoin y el S&P 500.



Fuente: Elaboración propia.

De manera paralela, el retorno de la inversión anual llega a tocar pérdidas insólitas, alcanzando valores extremadamente bajos de -84% a mediados de 2012, -78% a principios de 2015 –manteniendo unos retornos de la inversión anuales negativos durante todo el año– y de -83% a finales de 2018. Estos resultados coinciden exactamente con aquellas entradas al mercado en los puntos más álgidos de las etapas de euforia de Bitcoin. En resumen, una mala entrada en el mercado de Bitcoin puede tener unos resultados fatales para el inversor, pudiendo materializarse en pérdidas que habrían evaporado $\frac{3}{4}$ partes del capital invertido, confirmando a Bitcoin como una inversión altamente arriesgada.

Por su parte, la inversión en S&P 500 con un horizonte temporal móvil de un año muestra unos resultados muy interesantes teniendo en cuenta la liquidez, estabilidad y confianza que caracterizan a este mercado en contraposición a la incertidumbre propia

de Bitcoin. Y es que sus retornos han llegado a alcanzar cifras nada desdeñables del +67% anual coincidiendo con entradas y salidas del mercado a principios de marzo de 2009 y 2010 respectivamente, momento en que los mercados bursátiles de todo el mundo se recuperaban de los números rojos vividos durante el 2008. Esta tendencia se ha mantenido durante los 11 años analizados, con un crecimiento medio anual del 12,50% atendiendo a la serie de rendimientos móviles anuales.

A estos buenos resultados se les suma la escasez de rendimientos negativos anuales en el período analizado, dándose de manera circunstancial a finales de 2011 y principios de 2012 con resultados desfavorables no superiores al -4%, en un contexto de cifras macroeconómicas poco halagüeñas; a finales de 2015 y comienzos de 2016 con rendimientos anuales que alcanzaron el -10%, con motivo de la incertidumbre causada por la ralentización económica china; y durante los últimos suspiros del 2018, alcanzando cifras negativas de -12% a causa del *flash crash* vivido en los mercados bursátiles en las mismas fechas.

En definitiva, los rendimientos históricos obtenidos en uno y otro mercado difieren principalmente en tamaño. Bitcoin se consolida como activo especulativo, capaz de obtener resultados extremos tanto positivos como negativos en distintos horizontes temporales, haciendo de su inversión una completa montaña rusa. Por el otro lado, el S&P 500 se afianza como un índice robusto y de confianza en el que, durante el período analizado, los números rojos pasan casi desapercibidos en la foto global de los rendimientos anuales móviles. No obstante, observando las gráficas de rendimientos anuales para uno y otro mercado, las tendencias y sentimientos del mercado no parecen del todo inconexas. Y es que Bitcoin, pese a no depender directamente de variables económicas convencionales, sí parece mostrar cierta afinidad con los movimientos del mercado bursátil en determinados contextos.

2.3. Análisis de la volatilidad: Bitcoin y S&P 500

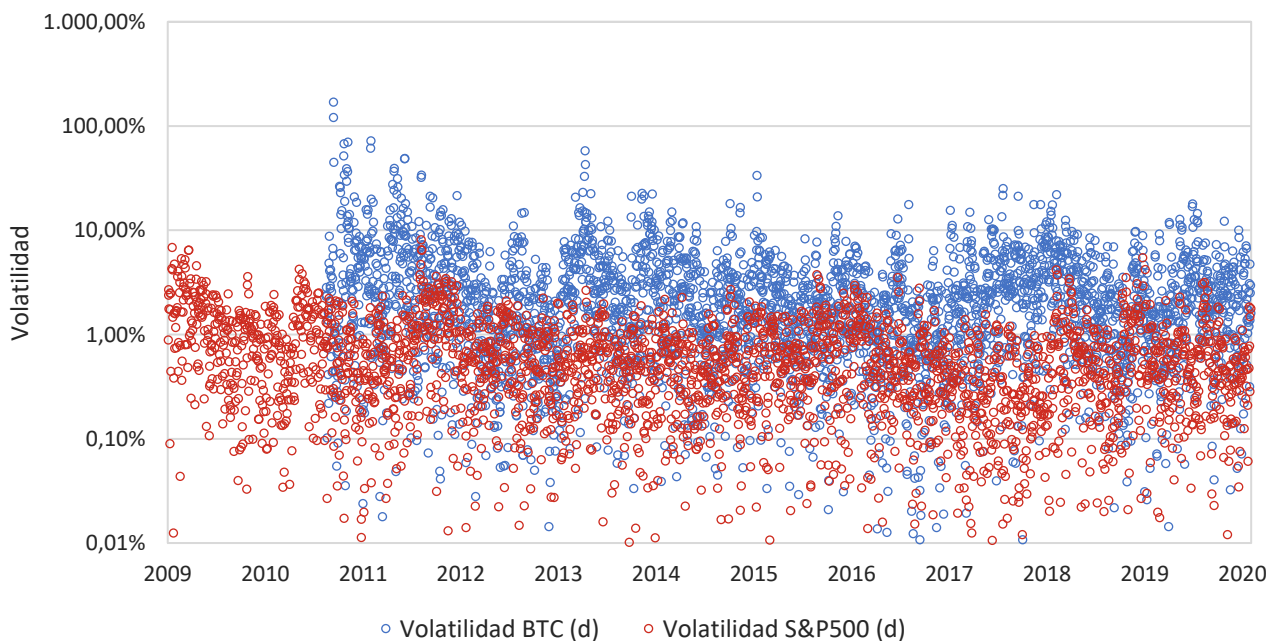
El riesgo, entendido como volatilidad, es un elemento inherente a la mayoría de los mercados. Su análisis es crucial para la identificación de oportunidades por parte de numerosos inversores, dado que los grandes resultados arraigan en gran medida en la variabilidad de los precios y retornos. En el presente apartado examinaremos la volatilidad de las rentabilidades diarias tanto para Bitcoin como para el mercado de valores a través del S&P 500 con el propósito de contextualizar sus rendimientos y

obtener una aproximación de la relación entre riesgo y beneficio de cada inversión. La volatilidad atenderá a la desviación estándar para los rendimientos diarios $r(t, \Delta t)$, calculada mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_t^n (r_{(t, \Delta t)} - \mu)^2}$$

Desde las primeras cotizaciones, Bitcoin siempre ha mostrado una volatilidad extrema en las fluctuaciones de sus rendimientos (véase Figura 8). Dado que es un activo de inversión relativamente nuevo, la formación de sus precios todavía es materia de estudio y teorización. La relativa juventud del criptoactivo y la poca madurez del mercado se convierten en un coctel ideal para la volatilidad, generando que sus oscilaciones habituales lleguen a decuplicar en varias ocasiones las de los mercados convencionales como el S&P 500.

Figura 8: Volatilidad diaria de Bitcoin vs S&P 500 en escala logarítmica.

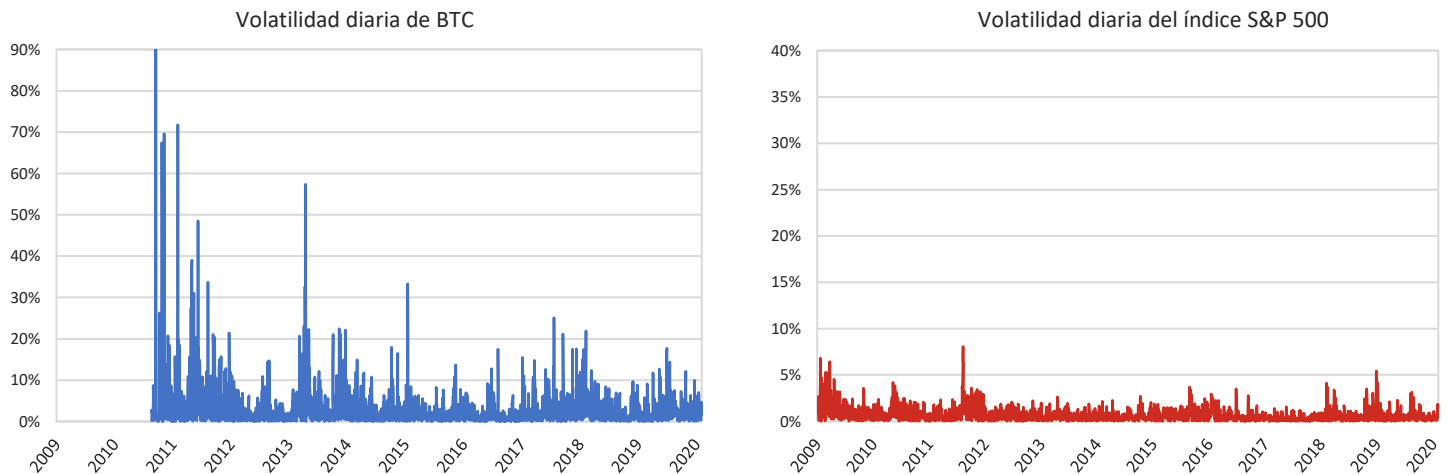


Fuente: Elaboración propia.

Los rendimientos de la criptomoneda exhiben un comportamiento persistentemente volátil durante todo el período analizado, con unas cifras que, aunque van de más a menos a medida que avanza el tiempo, siguen siendo muy superiores a las que nos tienen acostumbrados los mercados tradicionales (Véase Figura 9). Por otro

lado, la volatilidad diaria del S&P 500 se mantiene en cifras estables inferiores al 1% en el 75,57% de la serie, alcanzando volatilidades abruptas superiores al 3% en episodios poco habituales –representando el 1,86% sobre el total de datos.

Figura 9: Volatilidad diaria de los rendimientos de Bitcoin y el índice S&P 500.



Fuente: Elaboración propia.

En definitiva, se puede apreciar en Bitcoin una senda de evolución de la volatilidad similar a la plasmada en sus retornos, marcada por unas oscilaciones menguantes en el tiempo fruto de la madurez del mercado, acompañada de un mayor interés inversor y una consecuente mayor liquidez en circulación en torno a él. No obstante, a pesar de que Bitcoin parece mostrar una mayor integración en el plano financiero como vehículo de inversión alternativo, su mercado sigue siendo extremadamente volátil y arriesgado.

La interpretación habitual sobre el riesgo en las inversiones está asociada a la volatilidad del activo subyacente. Cuanto más volátil es un activo, mayor es el riesgo asumido; y cuanto más estable es un activo, menor es la exposición al riesgo, y por tanto, más segura la inversión. Sin embargo, este dualismo a la hora de catalogar un activo en arriesgado o seguro se deja en el tintero otros matices que impiden valorar de manera adecuada la calidad de la inversión, haciendo que la connotación negativa sobre la volatilidad pese por encima de otros factores.

Con la finalidad de obtener unos resultados más completos, se analizan distintos estadísticos descriptivos –media, mediana, máximo, mínimo, desviación estándar, asimetría, curtosis y rentabilidad por riesgo– atendiendo a los retornos semanales para Bitcoin y el índice S&P 500 (véase Tabla 2). El motivo de optar por los rendimientos

semanales en vez de los diarios radica en eliminar las diferencias en el número de observaciones de un mercado y otro, dado que las cotizaciones de los mercados tradicionales están vinculadas a la laboralidad de las sesiones, al contrario que en Bitcoin, el cual opera en los mercados los 365 días del año. En conclusión, es una decisión encaminada a hacer más fidedignos y equiparables los resultados, facilitando a mayores la obtención de otros indicadores como la matriz de correlaciones entre ambos mercados.

Tabla 2: Estadísticos descriptivos de los retornos semanales de Bitcoin y S&P 500 (2010-2020).

	BTC	S&P 500
Media	3,81%	0,24%
Media anualizada	198,56%	12,87%
Mediana	1,00%	0,35%
Rango	194,41%	21,71%
Máximo	151,25%	8,70%
Mínimo	-43,16%	-13,01%
Desviación Estándar	19,05%	2,06%
Volatilidad anualizada	137,39%	14,91%
Coef. Asimetría	3,1762	-0,8781
Curtosis	17,2249	6,2447
Ratio rentabilidad/riesgo	1,4452	0,8635
% Sesiones positivas	55,37%	59,83%
Observaciones	493	493

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados, Bitcoin es 9 veces más volátil que el índice S&P 500. Sin embargo, no por ello es una peor alternativa de inversión, dado que su rentabilidad media anualizada multiplica por 15 la obtenida por el índice estadounidense. De hecho, Bitcoin viene ofreciendo de media una ratio anual de rentabilidad-riesgo un 67,36% más elevado que el S&P 500, posicionando a la criptomoneda como un vehículo de inversión interesante con unos retornos superiores a los del mercado bursátil por cada unidad de riesgo asumida. La elevada volatilidad y los potenciales grandes rendimientos característicos de la criptomoneda la han posicionado como un activo a tener en cuenta por varios inversores, con capacidades de mejorar drásticamente la relación entre riesgo y beneficio en la diversificación de carteras (Brière et al., 2015).

Sin embargo, la presencia de riesgos significativos queda plasmada en la curtosis, con unos valores que ascienden a 17,22 y 6,24 para Bitcoin y S&P 500 respectivamente, generando unas curvas leptocúrticas en ambas series de retornos – con carácter más apuntado en el caso de la criptomoneda. El exceso de curtosis en los rendimientos de Bitcoin nos informa de una gran concentración de resultados en torno a la media y unas colas mucho más pesadas que en el caso del S&P 500. En resumen, la probabilidad de resultados extremos se acentúa de manera drástica en el caso de Bitcoin.

Los valores positivos de asimetría reflejan la existencia de una cola extensa a la derecha en la distribución de los retornos de Bitcoin, correspondiendo a datos excepcionales y valores atípicos de rentabilidad que llegan a alcanzar su máximo en 151,25%; el S&P, sin embargo, muestra una asimetría negativa acorde a sus máximos y mínimos, aglomerando gran cantidad de resultados en la zona neutral de la distribución con una cola mayor a la izquierda a causa de unos mínimos ligeramente más abultados que sus máximos.

En cuanto al grado de relación entre ambos mercados, atenderemos al cálculo de coeficiente de correlación de Pearson ρ (véase Tabla 3) con el objetivo de medir cómo de fuerte es esta conexión, calculado a partir de la covarianza de ambos mercados $\sigma_{BTC,S\&P500}$ y el producto de la desviación estándar de uno σ_{BTC} y otro $\sigma_{S\&P500}$:

$$\rho_{BTC,S\&P500} = \frac{\sigma_{BTC,S\&P500}}{\sigma_{BTC} \cdot \sigma_{S\&P500}}$$

Tabla 3: Matriz de correlaciones de Pearson y Test-t de los retornos semanales de Bitcoin y S&P 500.

	ROI BTC (s)	ROI S&P 500 (s)
ROI BTC (s)	1	
ROI S&P 500 (s)	0,0912775	1

Test t-student

H₀: $\rho=0$ H₁: $\rho \neq 0$

data: ROIBTC (s) and ROIS&P500 (s)

t = 2,0311, df = 491, p-value = 0,04279, qt($\alpha=0,05$) = $\pm 1,9648$

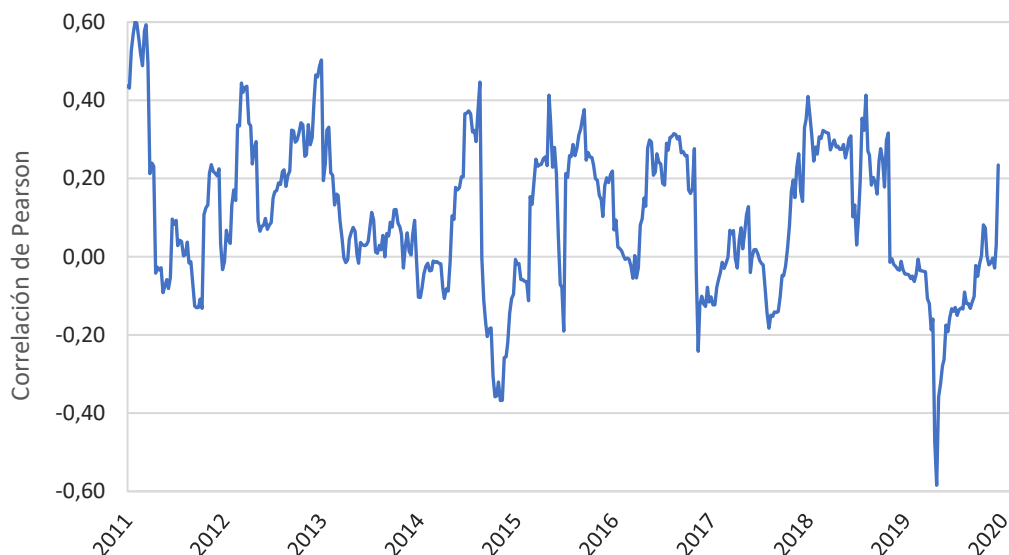
Fuente: Elaboración propia.

En consonancia con los análisis de Brière et al. (2015) y Klein et al. (2018) los resultados muestran un coeficiente escaso pero positivo, de 0,091 entre los

rendimientos de ambas inversiones (véase Tabla 3). A través del estadístico T para el contraste de hipótesis referente al coeficiente de correlación, obtenemos unos resultados que no permiten garantizar una correlación nula entre los retornos de Bitcoin y el S&P 500 –p-value (0,0427) < α (0,05). No obstante, la correlación entre ambos es mínima, inferior a 0,1. De hecho, atendiendo al coeficiente de determinación entre ambas variables, tan sólo el 0,81% de lo que varían los retornos semanales de Bitcoin viene explicado por lo que varían los retornos en el S&P 500, reflejando de manera palpable la independencia entre las dos series.

Pese a ello, varias voces han apuntado que los movimientos de la criptomoneda se encuentran correlacionados con los mercados bursátiles de manera dispar en el tiempo, estableciendo que las dinámicas de precios de Bitcoin guardan relación con las fluctuaciones de las principales bolsas de valores (Tulcanaza, 2018; Hamid et al., 2019). Podemos comprobar la veracidad de esta afirmación atendiendo al cálculo de correlaciones dinámicas entre los retornos de Bitcoin y el S&P 500 para un intervalo de tiempo más reducido que la totalidad del histórico (p. ej. 6 meses, equivalente a 26 semanas) y observando su evolución en el tiempo (véase Figura 10).

Figura 10: Correlación de Pearson dinámica entre los retornos semanales de Bitcoin y S&P 500 con rango semestral (6 meses = 26 semanas)



Fuente: Elaboración propia.

Se observa como la correlación con el mercado llega a alcanzar valores positivos algo más elevados, de hasta 0,40 de manera esporádica en varios años; y de manera

más consistente a lo largo del año 2018. Por el lado contrario, también son destacadas las correlaciones nulas o negativas sostenidas en el tiempo durante los años 2013, 2017 y 2019, reflejando una evolución independiente de los retornos de Bitcoin frente al índice bursátil americano. En resumen, la correlación entre Bitcoin y S&P 500 es poco significativa atendiendo a su evolución histórica pese a ciertos períodos de correlación más elevada. Sin embargo, los resultados han de ser tomados con cautela dado que su cálculo se ha computado en un contexto de mercado alcista para ambas inversiones, pudiendo variar dramáticamente durante períodos de crisis o turbulencias económicas (Brière et al., 2015).

En definitiva, los análisis realizados a lo largo de todo este bloque reflejan la alta volatilidad de la criptomoneda, pero también sus excepcionales retornos. La posibilidad de resultados extremos se dispara con la inversión en Bitcoin, destacando de manera más notable el volumen de los resultados positivos. Esto queda patente en las ratios de rentabilidad por riesgo, donde Bitcoin premia históricamente de manera superior el riesgo de volatilidad asumido en comparación con el S&P 500. El hecho de que Bitcoin muestre baja correlación con el principal mercado bursátil no necesariamente implica que esto se mantenga indefinidamente en el tiempo, sin embargo, atendiendo al histórico actual, los resultados posicionan a la criptomoneda como una inversión interesante dada su inconexión con los mercados y su carácter diversificador.

3. Modelización de Bitcoin

Conocidas las peculiaridades de Bitcoin como vehículo alternativo de inversión, el presente apartado pretende acercarnos un poco más a la evolución de sus cotizaciones partiendo de diferentes perspectivas para la estimación de sus precios y volatilidad en el tiempo. Para ello, las estimaciones atenderán a tres modelos diferentes.

El primer modelo tratará como variables las cotizaciones de Bitcoin y el tiempo. Es decir, mediante regresión lineal se modelizará la evolución histórica de precios de la criptomoneda con el fin de obtener una función que explique sus variaciones hasta la fecha actual, permitiendo extrapolarla para la estimación de precios futuros. La regresión y el proceso de modelización se desarrollan con mayor detalle en el apartado 3.1.

El segundo modelo basa el fenómeno de precios de Bitcoin en la evolución decreciente de la oferta monetaria de la criptomoneda. En otras palabras, lo que se plantea es un modelo regresivo que permite explicar la dinámica de precios de Bitcoin hasta día de hoy, tomando como variable explicativa la evolución del grado de abundancia de la criptomoneda en circulación, teniendo en cuenta la relación entre reservas y producción. La metodología a emplear en este modelo se desarrolla en profundidad en el apartado 3.2.

Por último, a través de un modelo autorregresivo GARCH se buscará modelizar la volatilidad de la criptomoneda en el corto plazo. El objetivo de este modelo es acercarnos a la evolución próxima de una variable que ha marcado con gran relevancia la visión que se tiene del activo, modelizando las variaciones de volatilidad de la criptomoneda partiendo de que esta variable tiende a mantenerse en el tiempo, alternando períodos de variaciones bruscas con períodos de oscilaciones reducidas. Los detalles del modelo se explican en el apartado 3.3.

3.1. Modelo de regresión basado en tiempo para Bitcoin

Para modelizar los precios de Bitcoin y estimar su evolución futura atenderemos al cálculo de una regresión lineal simple con el fin de modelar la relación entre la variable dependiente Y_t –en este caso, el precio– y la variable independiente X_t –referente al tiempo, entendido como los días transcurridos desde el nacimiento de la criptomoneda–

donde β_0 es la intercepción y β_1 el parámetro que mide la influencia de la variable explicativa sobre la explicada. Los resultados pasados no son un pronóstico ni garantía para los precios futuros, sin embargo, la modelización mediante regresión lineal atendiendo al tiempo nos permitirá obtener cierta perspectiva acerca de esta variable y la criptomoneda. La regresión estará representada por la función:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_t + \epsilon_t$$

Dada la función para la regresión lineal convencional, procedemos a la transformación logarítmica con base 10 de sus variables explicada y explicativa. El motivo principal de esta transformación radica en alejar la serie de precios de Bitcoin de una distribución con colas extremadamente pesadas, permitiendo obtener como resultado una distribución mucho más estable. Además, el uso de logaritmos en las variables es una forma muy común de manejar situaciones en las que existe una relación no lineal entre las variables independientes y dependientes originales (Benoit, 2011). Tomando estas modificaciones en cuenta, la nueva función para el cálculo de la regresión será:

$$Y'_t = \beta_0 + \beta_1 X'_t + \epsilon_t$$

$$\text{donde } Y'_t = \log Y_t ; X'_t = \log X_t$$

Bajo estas condiciones, es más probable que encontremos una relación lineal entre el paso del tiempo y los precios de Bitcoin, al reflejar ambas variables en una escala que representa mejor la evolución exponencial de precios vivida por la criptomoneda. Dicho algoritmo servirá para encontrar y representar la curva que mejor se adapte a los datos, buscando los parámetros que mejor definen la relación entre la variable dependiente e independiente en escala logarítmica, permitiéndonos obtener estimaciones futuras de precios en caso de que la ecuación sea representativa. La regresión lineal para la transformación logarítmica del precio diario de Bitcoin en relación con los días transcurridos desde la primera cotización de la criptomoneda arroja la siguiente ecuación $Y'_t = -11,516 + 4,3245 X'_t$ acompañada de una elevada bondad de ajuste de 0,9305 (véase Tabla 4). En definitiva, pese a que los residuos de la regresión son algo elevados fruto de las etapas de burbujas y desplomes de Bitcoin, el modelo explica el 93,05% de la variabilidad de precios de Bitcoin hasta la fecha.

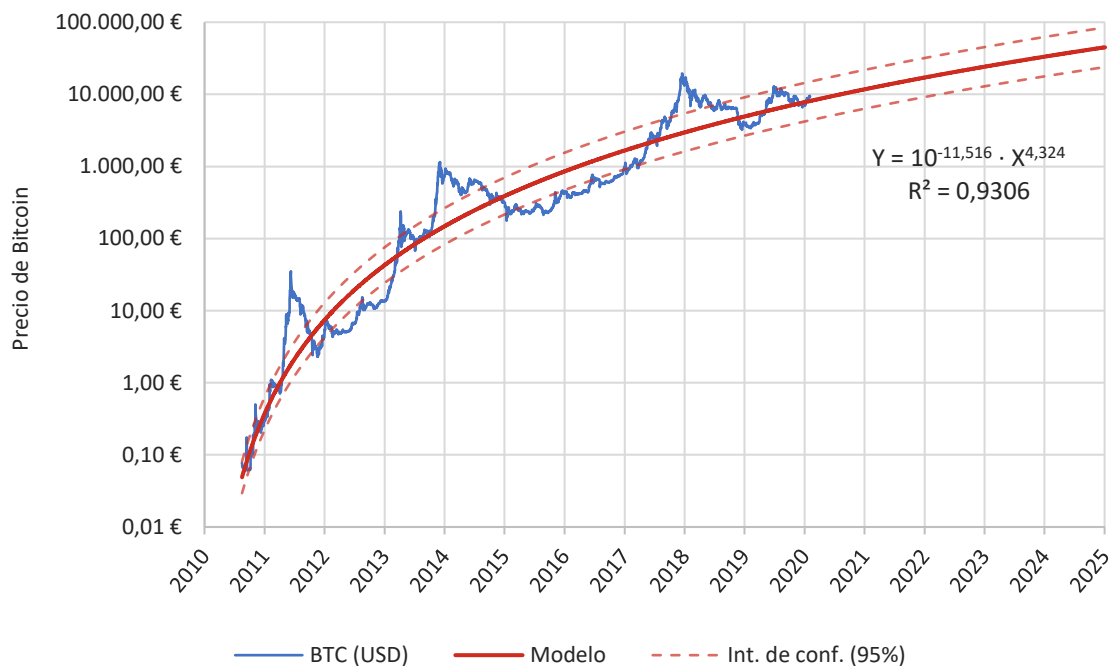
Tabla 4: Estadísticas de la regresión para las series log. de tiempo y precio de BTC (X'_t, Y'_t)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coef. corr. múltiple	0,9646691
R ²	0,9305865
R ² ajustado	0,9305665
Error típico	0,346179
Observaciones	3458

<i>Análisis de la Varianza</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	5552,5	5552,498	46332,6	0
Residuos	3456	414,167	0,11984		
Total	3457	5966,66			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción (β_0)	-11,51612	0,0648	-177,714	0	-11,643	-11,3891
Variable X 1 (β_1)	4,3245031	0,02009	215,2501	0	4,2851	4,36389

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11: Precios y recta de la regresión sobre series log. de precio y tiempo de Bitcoin.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que el factor tiempo es una variable significativa a la hora de explicar la evolución de precios de Bitcoin en términos exponenciales, permitiéndonos estimar precios futuros a partir de la ecuación de la regresión. Para obtener las estimaciones de precio del modelo transformaremos la ecuación de la regresión lineal a su forma inicial resolviendo los logaritmos en las variables. El resultado

es una ecuación no lineal de carácter exponencial $Y_t = 10^{-11,516} \cdot X_t^{4,324}$ (véase Figura 11).

Las estimaciones futuras sitúan los precios en valores que deberían rondar entre los \$23.873,65 y los \$84.444,39 a comienzos de 2025. En cualquier caso, debemos recordar que los precios estimados por el modelo no son exactos y de hecho, pueden verse alterados de manera sustancial por eventos críticos –no contemplados en el modelo– que puedan afectar la cotización del activo, como crisis económicas, regulaciones represivas contra Bitcoin, nuevos períodos de euforia, por poner algunos ejemplos. Por todo ello, el presente modelo es simplemente un reflejo del pasado, con la inexactitud que ello conlleva, permitiendo extrapolar la evolución de precios hacia el futuro a sabiendas de que la historia no tiene por qué repetirse, pero que, en ocasiones, puede rimar con el pasado.

3.2. Modelo de regresión basado en escasez para Bitcoin

El modelo presentado en este apartado asocia a Bitcoin la naturaleza de materia prima, estableciendo como valor fundamental y motor de la evolución de precios de la criptomoneda a una de sus características más peculiares, fuertemente ligada al proceso de minería y emisión de unidades Bitcoin: su escasez, entendida como el carácter limitado de su oferta monetaria, creciente a un ritmo decreciente en el tiempo.

El diseño tecnológico de Bitcoin lo sitúa como el primer activo digital limitado, incapaz de producirse de manera indefinida (Ammous, 2018). Sin embargo, otros bienes del plano tangible sí comparten el carácter limitado y escaso de la criptomoneda, como el oro o los diamantes. El atractivo de estas materias primas tan codiciadas radica en la imposibilidad de incrementar su oferta de manera descontrolada dada su reducida producción anual –a raíz de su escasez y dificultad de extracción– en comparación con sus reservas existentes. Dicho de otro modo, el nuevo suministro producido de estas materias primas es muy pequeño en relación con el suministro total preexistente.

Esta relación entre cantidad en circulación y producción ha sido empleada históricamente como métrica para cuantificar la fortaleza –entendida como capacidad de depósito de valor confiable y estable– de determinados activos y materias primas (Andersch, 2019). Esta ratio tiene en cuenta dos variables distintas relacionadas con la abundancia: (i) el *stock*, compuesto por la cantidad de unidades existentes, integrando

todo lo producido en el pasado menos todo lo consumido o destruido hasta la fecha actual; y (ii) el flujo, entendido como la producción adicional que incrementa el stock durante un período de tiempo determinado (generalmente un año). La proporción entre el stock y el flujo diario –en adelante, *stock-to-flow*– será empleada como indicador de la escasez de Bitcoin en el modelo¹⁸. A raíz de las peculiaridades del protocolo de Bitcoin –concretamente los *halving* y el proceso de minería–, la relación *stock-to-flow* (S2F) varía de manera significativa cada 4 años al reducirse la recompensa de los mineros en un 50%, y, por ende, la producción de nuevas unidades Bitcoin en la misma proporción. El efecto es inmediato sobre el indicador de escasez en Bitcoin, duplicando su ratio S2F con cada evento *halving*.

Las series de precios de Bitcoin empleadas para la regresión coinciden con las empleadas en previos apartados. No obstante, para el cálculo del *stock-to-flow* de la criptomoneda necesitaremos cierta información relevante acerca de la cantidad diaria producida de unidades Bitcoin (*flow*), así como la cantidad diaria total en circulación (*stock*). En este caso, emplearemos la serie histórica del número total de Bitcoins minados diariamente facilitada por Quandl¹⁹, la cual toma como referencia la información recopilada por *blockchain.com* calculando el número de Bitcoins en circulación a partir del número de bloques diarios minados y la recompensa teórica definida por el protocolo. Una vez conocido el número de unidades Bitcoin generadas de manera diaria, podremos calcular tanto el stock acumulado, como el flujo de producción en cualquier intervalo de tiempo, así como el ratio entre ambos valores.

El modelo atenderá a una regresión entre la variable dependiente Y_t , correspondiente al precio, y la variable independiente X_t referente a la escasez de Bitcoin teniendo en cuenta la ratio *stock-to-flow*. Adicionalmente, la fórmula estará compuesta por la intercepción β_0 y el parámetro β_1 acompañando a la variable explicativa. El algoritmo de la regresión tendrá la siguiente estructura:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_t + \epsilon_t$$

¹⁸ El modelo *stock-to-flow* planteado para Bitcoin por parte del analista anónimo con pseudónimo “PlanB” sugiere tener en cuenta para el cómputo del ratio los Bitcoin perdidos, considerando a estos efectos la cantidad de 1.000.000 de unidades; minadas por su creador Satoshi Nakamoto en los primeros compases del proyecto y que han permanecido inmóviles hasta hoy día.

¹⁹ <https://www.quandl.com/data/BCHAIN/TOTBC>

De manera análoga a la anterior regresión, emplearemos una escala logarítmica en ambas variables con el fin de erradicar las colas pesadas de la serie de precios de la criptomoneda y hacer ambas series más estables. El proceso de búsqueda de relaciones lineales entre las variables mediante regresión se llevará a cabo sobre los factores ya transformados con logaritmos. El resultado de la regresión arrojará una ecuación lineal, que dará como resultado final una ecuación potencial una vez resolvamos los logaritmos introducidos previamente. La explicación más simple a la aparición de esta clase de relaciones exponenciales no lineales entre variables es el crecimiento aleatorio de alguna de ellas (Gabaix, 2016). Y es que el incremento exorbitado del precio de Bitcoin a lo largo de su historia está plagado de valores atípicos que dificultan la obtención de relaciones lineales con otras variables salvo que agreguemos a la serie cierta estabilidad bajo alguna norma. Empleando la metodología planteada, el nuevo aspecto de la fórmula de la regresión será el siguiente:

$$Y'_t = \beta_0 + \beta_1 X'_t + \epsilon_t$$

$$\text{donde } Y'_t = \log Y_t; X'_t = \log X_t$$

La regresión lineal para la transformación logarítmica del precio diario de Bitcoin en relación con la ratio stock-to-flow genera la siguiente ecuación de la recta de regresión $Y'_t = -0,3806 + 3,0533 X'_t$ (véase Tabla 5).

Tabla 5: Estadísticas de la regresión para las series log. stock-to-flow y precio de BTC (X'_t, Y'_t)

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coef. corr. múltiple	0,9701022
R ²	0,9410984
R ² ajustado	0,9410813
Error típico	0,318891
Observaciones	3458

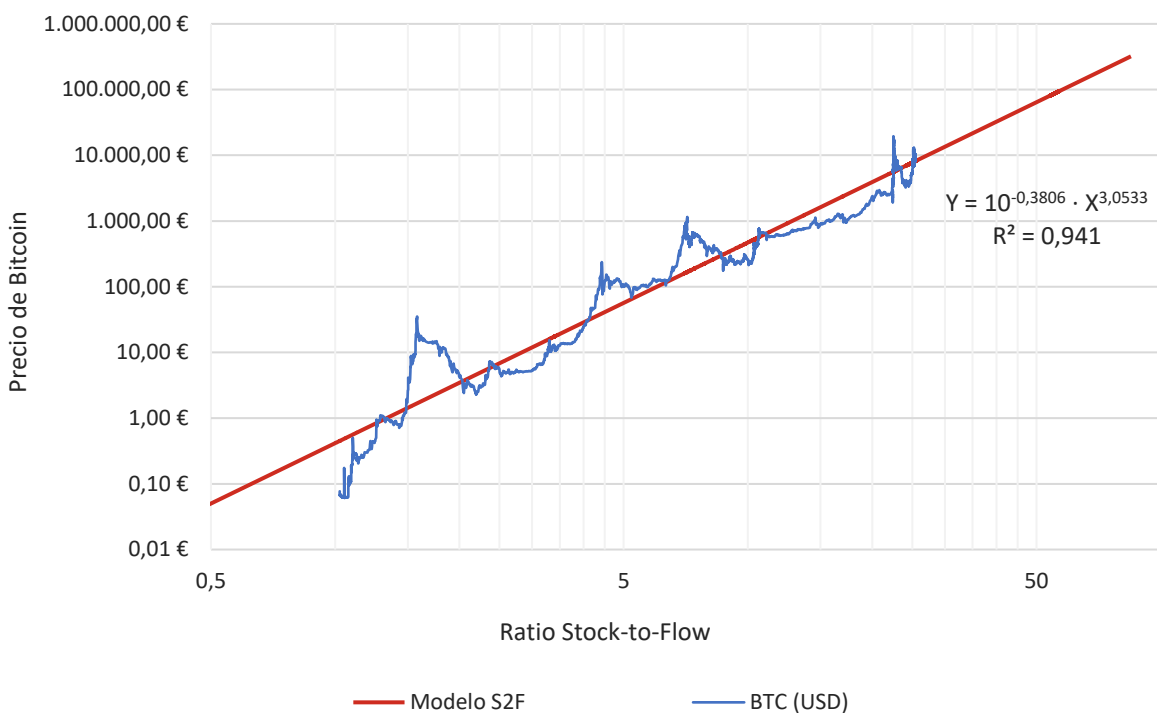
<i>Análisis de la Varianza</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	5615,218	5615,218	55218,112	0
Residuos	3456	351,446	0,10169		
Total	3457	5966,666			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción (β_0)	-0,380619	0,012919	-29,462	2,095E-170	-0,406	-0,355
Variable X 1 (β_1)	3,053321	0,012994	234,985	0	3,028	3,079

Fuente: Elaboración propia.

El modelo resultante explica el 94,10% de los movimientos de precio de la criptomoneda, por lo que la variable stock-to-flow, vinculada a la escasez de Bitcoin, se estima que tiene una gran relevancia en la formación de precios del activo. Estos resultados coinciden con la lógica de la ley de oferta y demanda de las economías de mercado, ya que, dado que la oferta de Bitcoin está fijada desde su nacimiento y su protocolo de emisión reduce la producción a la mitad cada 4 años, la oferta de este activo escasea cada vez más a medida que pasa el tiempo, provocando que los precios se incrementen en caso de que la demanda se mantenga constante para la criptomoneda.

Figura 12: Recta de regresión de las series stock-to-flow y precio de Bitcoin en escala logarítmica.

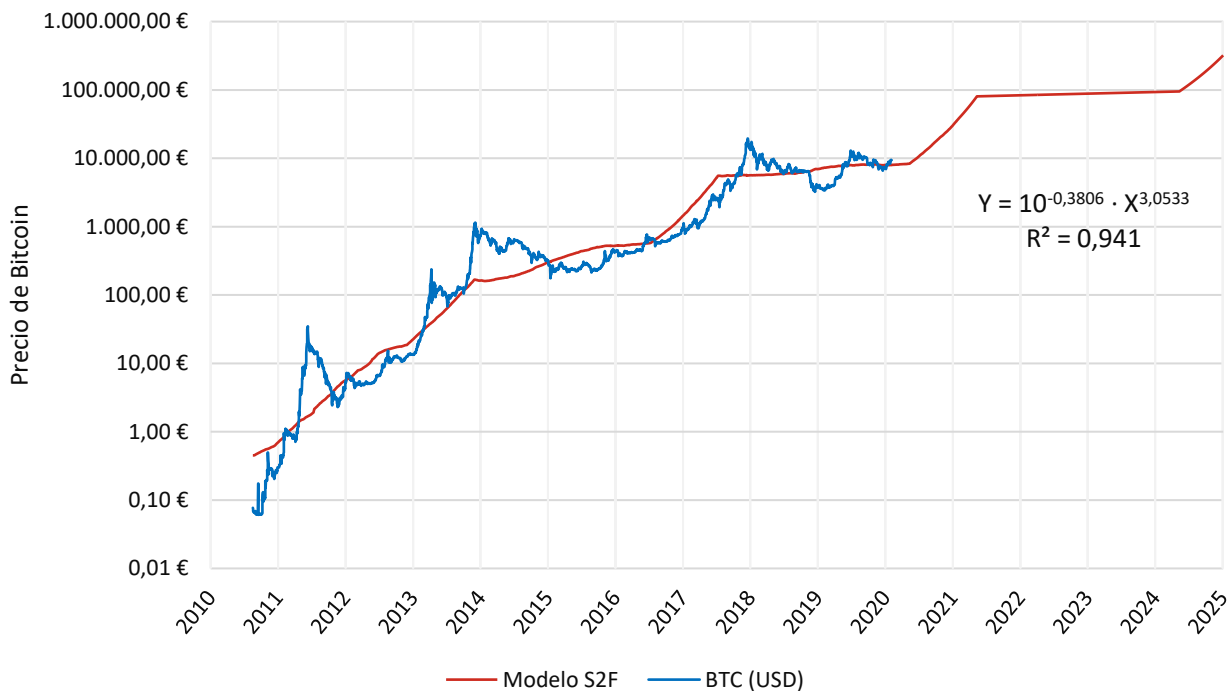


Fuente: Elaboración propia.

Resolviendo los logaritmos de las variables obtenemos la función exponencial equivalente $Y_t = 10^{-0,3806} \cdot X_t^{3,0533}$ generando un modelo cuya recta se ajusta de manera sorprendente a los datos de precios (véase Figura 12). El ratio S2F de Bitcoin a 3 de febrero de 2020 es de 25. Es decir, se necesitarían 25 años de producción de Bitcoin al ritmo de minado en esa fecha para alcanzar una cifra igual a la cantidad ya existente en circulación. El S2F actual de Bitcoin está cercano al de la plata, cuyo ratio

es de 20^{20} , y muy alejado del ratio del oro, con un valor de 60^{21} ; cifras que reflejan la escasez de estas materias primas y les da a estos metales elevados valores monetarios. Sin embargo, como ya se ha comentado de manera previa, cada 210.000 bloques minados –aproximadamente cada 4 años– el protocolo de Bitcoin reduce la emisión de nuevas unidades monetarias a la mitad, implicando que en el halving más cercano (el cual se estima en mayo de 2020) se elevará el ratio S2F de la criptomoneda a 50. Esta dinámica del protocolo de Bitcoin continuará a lo largo del tiempo con cada evento halving, generando que la producción de Bitcoin disminuya a la par que su indicador de escasez se incrementa. Gracias a la certeza y transparencia del proceso de minado de Bitcoin y teniendo en cuenta el modelo exponencial S2F, podemos estimar los precios futuros del criptoactivo tomando como premisa la escasez como conductor principal del valor de la criptomoneda.

Figura 13: Precios y modelo exponencial Stock-to-Flow (S2F) de Bitcoin en eje de tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

²⁰ Cálculo realizado teniendo en cuenta las estimaciones de reservas (560.000 t.) y producción anual global de plata en el 2019 (27.000 t.) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

²¹ Cálculo realizado teniendo en cuenta las cifras estimadas de oro en circulación (197.576 t.) por la World Gold Council y la producción anual global de oro en 2019 (3.300 t.) facilitada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Las estimaciones de precios pueden representarse atendiendo a un eje de tiempo, dado que cada valor del modelo corresponde a un día natural (véase Figura 13). Si nos alejamos de las distorsiones de los precios en etapas de burbuja, se puede observar como el valor estimado y el real difieren poco. Cada halving produce un salto en el ratio S2F, que a su vez se acaba traduciendo en un incremento del valor de Bitcoin según el modelo, y que tarde o temprano termina materializándose en el precio de cotización. Los pronósticos de la recta de regresión sitúan los precios de Bitcoin entre los \$71.180,95 y los \$109.548,16 en un rango de tiempo entre 2021 y 2024 según el modelo, con un ratio S2F de 50.

La relación estadística significativa entre el valor de mercado y la escasez de Bitcoin no es incompatible con otras variables alternativas. Evidentemente, los precios de la criptomoneda no atienden a una sola variable, sino a un conjunto de ellas, relevantes para el mercado en el que se desarrolla, como el interés público en la criptomoneda –medido en volumen de búsquedas de la palabra clave “Bitcoin” en Google–, o los costes marginales de producción, por poner algunos ejemplos. Sin embargo, estas variables no son predecibles en el largo plazo, a diferencia de la evolución de la escasez de Bitcoin –cuantificable a través del ratio S2F–, la cual está definida y delimitada desde el primer momento de existencia de la criptomoneda. No obstante, las interpretaciones y pronósticos del modelo han de ser tomadas con cautela ante la cantidad de eventos incontrolables que pueden afectar de manera drástica a la cotización del criptoactivo fruto de la incertidumbre en torno a su futuro. Con todo, el modelo permite simplificar de manera magistral el fenómeno de precios vivido hasta la fecha por parte de Bitcoin. El ratio S2F, empleado para la medición de la escasez relativa en metales preciosos, encuentra su nicho en la valoración de Bitcoin ante una nueva forma de entender la escasez. Una escasez de carácter absoluto y de naturaleza intangible, ya que la criptomoneda se erige como un bien intangible diseñado para exhibir escasez digital, matemáticamente calculada y codificada en su software para que su máxima oferta posible esté predeterminada.

3.3. Modelo autorregresivo de la volatilidad para Bitcoin

El análisis de la volatilidad y su estimación a partir de modelos basados en series históricas ha sido un tema de investigación recurrente en el ámbito financiero dado su importante rol en la gestión del riesgo de carteras. Dentro de la tipología de modelos

autorregresivos, hay algunos modelos de contrastada eficacia en el pronóstico de la volatilidad a corto plazo, como los ARCH y los GARCH.

En general, los modelos ARCH se basan en la información útil disponible, atendiendo a los retornos de precios históricos y explicando la variación de la innovación a partir de los residuos empleando un formato autorregresivo. Los modelos ARCH son ideales cuando la varianza de los residuos siga un modelo autorregresivo; los GARCH, serán más adecuados cuando se asuma de manera adicional un modelo ARMA para la varianza de los errores. En este apartado atenderemos a los resultados para un modelo predictivo GARCH (1,1) para explicar los movimientos de volatilidad de la criptomoneda en el futuro. Por simplicidad del análisis, y dada su eficiencia y suficiencia contrastada con retardos lo suficientemente flexibles, el modelo se restringe a un orden máximo de uno (Naimy & Hayek, 2018). Adicionalmente, este modelo suele escogerse como ideal para representar el análisis a corto plazo atendiendo a datos de recientes períodos ya que la autocorrelación no persiste a lo largo de intervalos de tiempo prolongados.

En primera instancia, determinaremos los retornos semanales $r_t = \log(p_t/p_{t-1})$ a partir de la serie de precios original empleada a lo largo del trabajo, para luego definir Z_t como el error o la innovación, es decir, los residuos de los retornos de los precios semanales de Bitcoin respecto a la media:

$$Z_t = \sigma_t \varepsilon_t$$

Los modelos GARCH siguen la especificación anterior, donde σ_t es la desviación estándar en un momento t y ε_t es una sucesión de variables aleatorias idénticas e independientemente distribuidas con media cero y varianza constante –ruido blanco. El proceso de volatilidad σ_t difiere de un modelo a otro, y la innovación Z_t puede atender a distintas distribuciones, siendo las más habituales la normal de Gauss, la t-Student y la distribución de errores generalizada. Tras comprobar mediante la prueba de Ljung-Box que las series de residuos de los retornos muestran una autocorrelación serial inexistente para un nivel de significancia del 5% proseguimos con la estimación. El modelo GARCH estándar (Bollerslev, 1986) empleado para el actual análisis tiene la denominación GARCH (1,1) y su estructura es la siguiente:

$$\sigma_t^2 = \omega + \alpha_1 Z_{t-1}^2 + \beta_1 \sigma_{t-1}^2$$

$$\text{con } \omega > 0 ; \alpha_1 > 0 ; \beta_1 > 0$$

siendo $\alpha_1 + \beta_1 < 1$

El modelo busca definir la varianza condicional σ_t^2 en un momento determinado t , a partir de las variaciones previas de la muestra de residuos al cuadrado Z_{t-1}^2 y la varianza condicional de anteriores períodos σ_{t-1}^2 . Adicionalmente, ω será una constante –la intercepción–, correspondiendo α_1 y β_1 a los parámetros que miden el grado de efecto de las variables comentadas anteriormente, Z_{t-1}^2 y σ_{t-1}^2 respectivamente. En cuanto a las funciones de densidad de probabilidad, los modelos GARCH normalmente distribuidos acostumbra a ser superados por los modelos GARCH con distribución t-Student siempre que hablamos de retornos financieros, al adaptarse mejor a las colas pesadas de estas series de datos (Troster et al., 2018). Adicionalmente, optaremos por una t-Student asimétrica con el fin de minorar los residuos atendiendo a captar la mayor cantidad de valores atípicos posibles. Teniendo esto en cuenta, la ecuación de la volatilidad resultante del modelo GARCH (1,1) atendiendo a los parámetros óptimos para una distribución t-Student es $\sigma_t^2 = 0,001147 + 0.333711 Z_{t-1}^2 + 0,628854 \sigma_{t-1}^2$ (Véase Tabla 6).

Tabla 6: Estadísticas del modelo de volatilidad en Bitcoin ARMA(0,0,0)+GARCH(1,1) para distribución t-Student asimétrica.

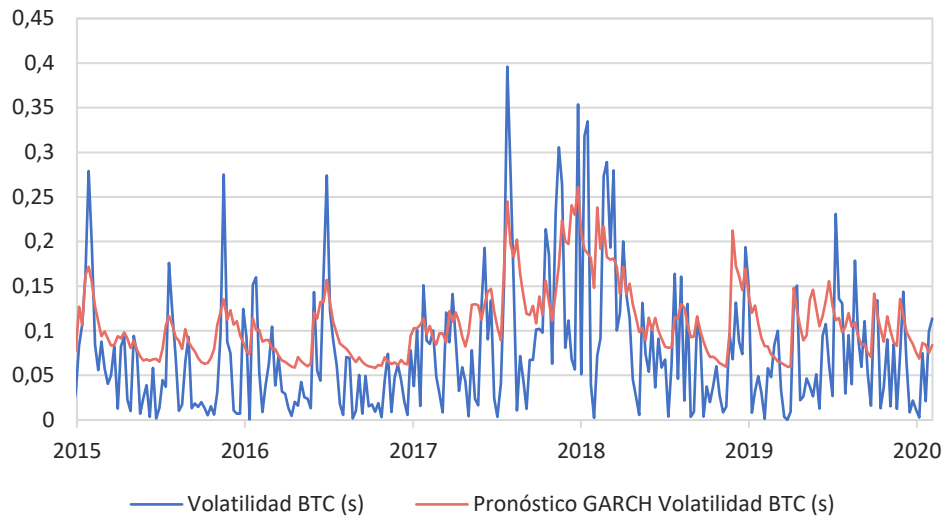
<i>Conditional Variance Dynamics</i>	
GARCH Model	sGARCH (1,1)
Mean Model	ARFIMA (0,0,0)
Distribution	t-Student (sstd)

<i>Optimal Parameters</i>	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t-value</i>	<i>Pr (> t)</i>
Omega	0,001147	0,000545	2,1046	0,035322
Alpha1	0,333711	0,120694	2,7649	0,005693
Beta1	0,628854	0,091402	6,8801	0,000000
Skew	0,860840	0,061175	14,0717	0,000000
Shape	5,779167	2,317058	2,4942	0,051790

LogLikelihood: 259,599

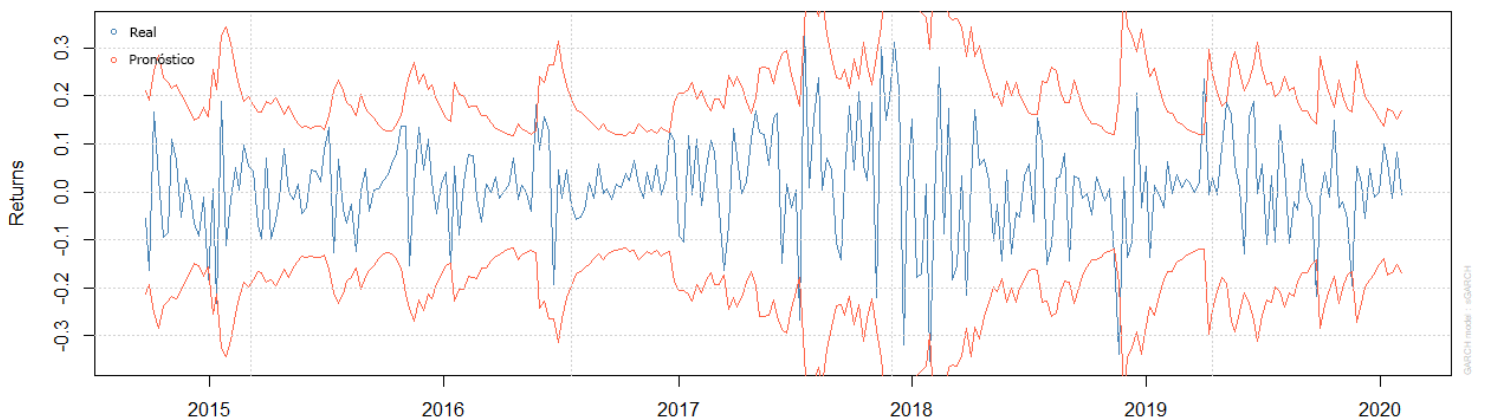
<i>Information Criteria</i>	<i>Coeficientes</i>
Akaike (AIC)	-1,8121
Bayes (BIC)	-1,7474
Shibata	-1,8127
Hannan-Quinn	-1,7861

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14: Volatilidad semanal real y estimada por el modelo GARCH (1,1) para Bitcoin.

Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo del propio modelo muestra unos resultados de pronóstico que logran explicar los movimientos más bruscos de los retornos históricos para Bitcoin, suavizando la serie de volatilidad de la criptomoneda (véase Figura 14). De hecho, el modelo tiende a sobreestimar la volatilidad en momentos de reducida variabilidad real, mientras que, a su vez, tiende a minusvalorar los picos de volatilidad en las grandes oscilaciones de los retornos de la criptomoneda. Estas moderadas deficiencias en los pronósticos vuelven a quedar patentes y son más observables si atendemos a las dos bandas de retornos estimadas y las comparamos con la serie real (véase Figura 15).

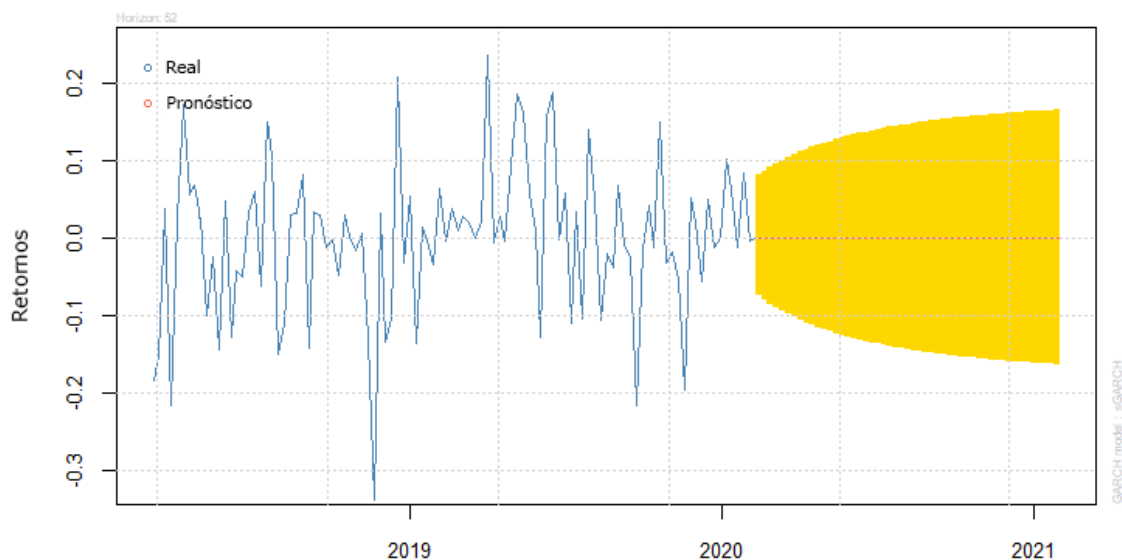
Figura 15: Pronóstico de los retornos del modelo GARCH (1,1) y la serie real de retornos semanales de Bitcoin.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa con mayor claridad como las pequeñas oscilaciones de rentabilidad son exageradas por las estimaciones del modelo. La situación opuesta ocurre para las variaciones de retornos más acusadas, las cuales sobrepasan los límites de las bandas de rentabilidad estimada. En resumen, los pronósticos de volatilidad del modelo se muestran activos ante los movimientos de los retornos semanales previos dado su carácter autorregresivo, pero tienden a exagerar en términos generales los retornos y volatilidad real de la criptomoneda, aunque el desempeño del modelo haya sido satisfactorio para períodos como el 2019, por ejemplo, dadas las elevadas volatilidades intersemanales sostenidas a lo largo del período.

El pronóstico para un horizonte temporal de un año desde el último dato conocido refleja una banda de volatilidad en forma de embudo cuya boca se amplía a medida que avanza en el tiempo (véase Figura 16). Esto es consistente con la tendencia de baja volatilidad semanal vivida en los primeros compases de 2020, generando que la volatilidad estimada para el corto plazo no sea exorbitada, pero sí creciente y menos precisa a medida que nos alejamos de los datos conocidos. Los límites máximos de volatilidad estimados en las sesiones próximas al último dato conocido sitúan a los retornos semanales en un rango máximo del $\pm 8,5\%$, frente a unos resultados máximos esperados de $\pm 17\%$ para comienzos de 2021.

Figura 16: Pronóstico de los retornos semanales de Bitcoin según modelo GARCH (1,1).



Fuente: Elaboración propia.

En definitiva, el modelo predictivo de volatilidad GARCH (1,1) a través de una distribución t-student para sus innovaciones nos permite acercarnos de manera consistente a las volatilidades semanales de los retornos de la criptomoneda en el corto plazo. No obstante, no debemos olvidar que la exageración de los pronósticos de volatilidad frente a las oscilaciones reales del modelo puede conducir a pronósticos de riesgo deficientes y retornos esperados poco realistas. Adicionalmente, la dependencia de valores previos de esta clase de modelos de carácter autorregresivo dificulta en gran medida la obtención de predicciones confiables en largo plazo, siendo mucho más certeros en extrapolaciones futuras cortoplacistas dada la corta memoria del sistema.

4. Conclusiones finales

A lo largo del documento, Bitcoin ha sido analizado a conciencia con un objetivo prioritario en mente: valorar las capacidades de la criptomoneda como vehículo de inversión alternativo. Para ello, en los primeros compases del trabajo nos hemos acercado al proyecto original a través de la literatura al respecto, atendiendo a las peculiaridades, funcionamiento y proceso de emisión de unidades Bitcoin con la finalidad de comprender la naturaleza de la criptomoneda.

El resultado es que, pese a su función primigenia como medio de pago y moneda alternativa, a día de hoy Bitcoin es considerado como una materia prima –aunque de carácter sintético– fruto de su proceso de producción y las obvias similitudes que comparte con los procesos de extracción de otras materias primas y bienes –siendo la mano de obra en el caso de la criptomoneda el poder de computación de los nodos mineros. Pese a esta etiqueta, Bitcoin sigue desempeñando las funciones monetarias con las que fue concienzudamente pensado en origen. Su influencia en el ámbito financiero es irreprochable, ya que países como China o Suecia ya tienen listos prototipos y proyectos piloto de su propia criptomoneda estatal, mientras organismos como el BCE manifiestan su interés en la tecnología para desarrollar su propio sistema monetario digital (Klein et al. 2020). Y es que, en el actual contexto tecnológico, la criptomoneda se erige como una alternativa viable a las divisas fiduciarias convencionales al mantener las mejores características monetarias de las divisas modernas (fungibilidad, durabilidad, portabilidad, divisibilidad y seguridad) e incorporando otras nuevas (escasez y descentralización). No obstante, dados los movimientos especulativos en la criptomoneda vividos a lo largo de su existencia, numerosos usuarios son los que mantienen Bitcoin con fines inversores en lugar de su uso como medio de pago. Aun así, la incerteza regulatoria que rodea la criptomoneda en cuanto a su posesión y producción –actividad de minería– sigue generando una gran incertidumbre en su porvenir, amedrentando principalmente al interés del inversor institucional.

Su regulación sigue siendo una cuestión política internacional a tratar dado el volumen de actividades delictivas que se desarrollan con la criptomoneda. La preocupación de las autoridades ante esta situación es notoria y las nuevas

regulaciones así lo reflejan, maximizando el control y la obligación de información sobre los movimientos de flujos monetarios a través de los *cryptoexchanges* con la finalidad de prevenir el lavado de dinero y la financiación de actividades ilegales. Con todo, la supervisión reguladora encuentra en Bitcoin un verdadero desafío fruto del anonimato de las transacciones, el carácter descentralizado de la red y la independencia de organismos y bancos centrales. Sin embargo, esto no parece haber sido un obstáculo para Bitcoin, ya que el interés por la criptomoneda ha ido *in crescendo* hasta nuestros días en todas las esferas de la sociedad, acompañado de una astronómica escalada de precios.

Si bien es cierto que Bitcoin no produce dividendos ni flujos de efectivo fruto de su naturaleza, el meteórico incremento de su valor a lo largo del tiempo le ha permitido ganarse el interés de numerosos inversores. Este interés ha consolidado a la criptomoneda como un activo de inversión alternativo, quedando reflejado su carácter especulativo en los históricos de precios, retornos y volatilidades. Los dramáticos incrementos y desplomes de precio de Bitcoin propios de un mercado inmaduro e ilíquido se han ido atenuando con el paso de los años, síntoma de una mayor estabilidad y madurez en el mercado secundario de la criptomoneda. De hecho, la tónica reciente sugiere una evolución que tiende hacia una mayor estandarización de precios, acompañada de retornos y volatilidades decrecientes con el tiempo.

Poniendo en perspectiva tanto la rentabilidad como la volatilidad de Bitcoin con la de los mercados convencionales –en este caso, el índice S&P 500–, encontramos que las diferencias son más que notables. Los resultados de los análisis de precios apuntan que el riesgo de inversión en Bitcoin, entendido como volatilidad, es 9 veces superior al del índice; cifras que compensa con unas rentabilidades medias 15 veces superiores a las del mercado, permitiéndole a la criptomoneda ofrecer unos retornos por riesgo asumido bastante superiores a los del principal índice de referencia estadounidense. Como consecuencia de estos resultados y su independencia de los indicadores económicos convencionales, así como su cuasi nula correlación con los mercados bursátiles –reflejado a través del S&P 500 en este trabajo– podemos asegurar sin miedo a equivocarnos que Bitcoin es un activo muy a tener en cuenta en el plano financiero a raíz de su efecto diversificador, permitiendo optimizar la gestión de riesgos en carteras cumpliendo funciones de cobertura.

Adicionalmente, a través de la formulación y examen de tres modelos –dos regresivos y uno autorregresivo– se ha intentado explicar la formación de precios y la volatilidad para Bitcoin. Desde el punto de vista práctico, los modelos regresivos planteados permiten ser empleados con fines predictivos, posibilitando especular sobre evoluciones de precios factibles para la criptomoneda. El primer modelo refleja el factor tiempo como protagonista de la valoración de Bitcoin, en el que cada día de existencia y funcionamiento exitoso del software repercute de manera positiva en el precio de las unidades Bitcoin en circulación. El efecto Lindy²² puede ser una de las explicaciones a este fenómeno, estableciendo que, los intangibles impercederos –como la tecnología blockchain, y en este caso, el máximo exponente de su uso, Bitcoin– tienen una esperanza de vida que aumenta con cada día de supervivencia (Taleb, 2012). Es decir, la variable tiempo parece jugar en favor de la criptomoneda, incrementando sus probabilidades de éxito como tecnología relevante, al mismo tiempo que se incrementa su valor dado el carácter limitado de unidades Bitcoin. En definitiva, podría pensarse que el fenómeno de precios de la criptomoneda proviene de la especulación sobre su escasez en el tiempo, capturando un valor a futuro que a día de hoy y a simple vista somos incapaces de medir. De esta idea surge el segundo modelo, encaminado a explicar el fenómeno de precios en Bitcoin a través de la variable escasez –entendida como el coeficiente resultante del ratio stock-to-flow. El carácter limitado de la oferta de unidades Bitcoin y las peculiaridades de su minería harán que la percepción de escasez se incremente inexorablemente con el tiempo, generando un escenario en el que, ante un hipotético incremento de la demanda, los precios se elevarían drásticamente. A pesar del carácter significativo de ambas variables –tiempo y escasez– a la hora de explicar los precios de Bitcoin, los pronósticos de los modelos planteados son meras estimaciones y no una certeza. Por ello, debemos ser prudentes a la hora de interpretar unos resultados a los que se le escapan infinidad de variables, eventos y contextos incontrolables a la hora de determinar el valor y precio de Bitcoin en el mercado.

Por otra parte, el modelo autorregresivo planteado no logra explicar de manera satisfactoria la tormentosa volatilidad de la criptomoneda. De hecho, sus estimaciones tienden a exagerar en términos generales las oscilaciones reales de los precios, generando unos resultados que, aunque no son malos, se alejan del nivel deseado de significación. El principal obstáculo reside en la dependencia de las cotizaciones de

²² Teoría que plantea que la esperanza de vida de intangibles no percederos (tecnologías, patentes, ideas, etc.) es proporcional a su edad actual. Es decir, cada período de tiempo adicional de existencia del intangible implica un incremento de su esperanza de vida en la misma proporción.

Bitcoin de factores imprevisibles como noticias, actualizaciones del marco regulatorio o períodos de euforia o pánico, generando virulentas variaciones en la volatilidad de la criptomoneda incapaces de ser predichas mediante procesos autorregresivos.

En definitiva, el carácter limitado y la escasez absoluta de Bitcoin convierten a la criptomoneda en un activo peculiar, con cualidades muy interesantes desde el punto de vista inversor relacionadas con su ratio rentabilidad-riesgo y su efecto diversificador. Adicionalmente, el carácter disruptivo de su tecnología subyacente –la blockchain– y la atención que suscita entre grandes empresas tecnológicas y organismos gubernamentales parece empujar más si cabe el interés por la criptomoneda. Tras 11 años de exitoso funcionamiento, no parece que la historia escrita por Bitcoin esté cercana a su desenlace, sino todo lo contrario.

Bibliografía

- Abken, P. A. (1980). *The Economics of Gold Price Movements*. Federal Reserve Bank of Richmond, Economic Review, Marzo/Abril, pp. 3–13.
- Andersch, M. (2019). Is bitcoin outshining gold? *Megatrend Digitalisation*, Bayern LB. Recuperado el 12 de marzo de 2020 en <https://www.bayernlb.com/internet/media/ir/downloads_1/bayernlb_research/megatrend_publicationen/megatrend_bitcoins2f_20190930_EN.pdf>
- Ammous, S. (2018). *The Bitcoin Standard: The Decentralized Alternative to Central Banking*. Jhon Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Awataguchi, T. (2019). Japan. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 348–357.
- Bagus, P. (2009). The Quality of Money. *The Quarterly Journal of Austrian Economics*, 12 (4), pp. 22–45.
- Baudoncq, M. & Wilmet, F. (2019). Belgium. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 215–224.
- Baur, D.G., Hong, K. & Lee, A.D. (2018). Bitcoin: medium of exchange or speculative assets? *Journal of International Financial Markets, institutions & Money*, 54, pp. 177–189.
- Benoit, K. (2011). *Linear Regression Models with Logarithmic Transformations*. Methodology Institute, London School of Economics.
- Blundell-Wignall, A. (2014). The Bitcoin Question: Currency versus Trust-less Transfer Technology. *OECD Working Papers on Finance, Insurance and Private Pensions*, 37, OECD Publishing.
- Böhme R., Christin N., Edelman B. & Moore T. (2015). Bitcoin: Economics, Technology, and Governance. *The Journal of Economic Perspectives*, 29 (2), pp. 213-238.

- Bollerslev, T. (1986). Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 31, pp. 307–327.
- Borg, J. F. & Schembri, T. (2019). The regulation of blockchain technology. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 187–191.
- Charfeddine, L., Benlagha, N. & Maouchi, Y. (2020). Investigating the dynamic relationship between cryptocurrencies and conventional assets: Implications for financial investors. *Economic Modelling*. 85, pp. 198–217.
- Comisión Europea (2019). Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo: Hacia una mejor aplicación del marco de la UE para la lucha contra el blanqueo de capitales y la financiación del terrorismo, 24 de Julio de 2019, COM(2019) 360 final. Recuperado el 18 de marzo de 2020 en <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019DC0360>>
- Comisión Europea (2019). Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo sobre la evaluación de los riesgos de blanqueo de capitales y financiación del terrorismo que afectan al mercado interior y están relacionados con actividades transfronterizas, 24 de Julio de 2019, COM(2019) 370 final. Recuperado el 18 de marzo de 2020 en <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019DC0370>>
- Corbet, S., Meegan, A., Larkin, C., Lucey, B. & Yarovaya, L. (2018). Exploring the Dynamic relationships between cryptocurrencies and other financial assets. *Economics Letters*, 165, pp. 28–34.
- Cverkova, I. (2018). Cryptocurrencies legal regulation. *Brics Law Journal*, 5 (2), pp. 128–153.
- Dewey, J. (2019). USA. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 478–486.
- Druzeta, C., Grant, S. & Peters, M. (2019). Canada. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 242–252.
- Dwyer, G. P. (2015). The economics of Bitcoin and similar private digital currencies. *Journal of Financial Stability*, 17, pp. 81–91.

- European Banking Authority (2013). Warning On Virtual Currencies. Recuperado el 9 de marzo de 2020 en <<https://eba.europa.eu/eba-warns-consumers-on-virtual-currencies>>
- Financial Action Task Force (2019). *Guidance for a Risk-Based Approach: Virtual Assets and Virtual Asset Service Providers*. Recuperado el 18 de marzo de 2020 en <<https://www.fatf-gafi.org/media/fatf/documents/recommendations/RBA-VA-VASPs.pdf>>
- Foley, S., Karlsen, J. R. & Putninš, T. J. (2019). Sex, Drugs, and Bitcoin: How Much Illegal Activity is Financed through Cryptocurrencies? *The Review of Financial Studies*, 32 (5), pp. 1798–1853.
- Gabaix, X. (2016). Power laws in Economics: An Introduction. *Journal of Economic Perspectives*, 30 (1), pp. 185–206.
- Gerlach, J. C., Demos, G. & Sornette, D. (2019). Dissection of Bitcoin’s multiscale bubble history from January 2012 to February 2018. *Royal Society Open Science*, 6 (7).
- Glaser, F., Zimmermann, K., Haferkorn, M., Weber, M.C. & Siering, M. (2014). *Bitcoin—asset or currency? revealing users’ hidden intentions*. 22nd European Conference on Information Systems, Tel Aviv.
- Gong, L. & Yu, L. (2019). China. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 261–266.
- Graf, K. S. (2013). *On the origins of Bitcoin: Stages of monetary evolution*. Recuperado el 18 de febrero de 2020 en <<https://nakamotoinstitute.org/static/docs/origins-of-bitcoin.pdf>>
- Hamid, A. F. A. & Talib A. A. (2019). A note on Bitcoin’s price volatility. *Jurnal Keuangan dan Perbankan*, 23 (3), pp. 376–384.
- Hayes, A. (2015). *A Cost of Production Model for Bitcoin*. Department of Economics, The New School for Social Research.
- Houben, R. & Snyers, A. (2018). Cryptocurrencies and blockchain: Legal context and implications for financial crime, money laundering and tax evasion. Recuperado

el 15 de marzo de 2020 en <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/631f847c-b4aa-11e8-99ee-01aa75ed71a1>>

Houben, R. & Snyers, A. (2020). Crypto-assets: Key developments, regulatory concerns and responses. Recuperado el 15 de marzo de 2020 en <[https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=IPOL_STU\(2020\)648779](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=IPOL_STU(2020)648779)>

Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación (INTECO) (2014). Bitcoin: A cryptographic currency. Recuperado el 9 de febrero de 2020 en <https://www.incibe.es/extfrontinteco/img/File/intecocert/EstudiosInformes/int_bitcoin_en.pdf>

Kaplanov, N.M. (2012) Nerdy Money: Bitcoin, the Private Digital Currency, and the Case Against its Regulation. *Loyola Consumer Law Review*, 25 (1), pp. 111-174.

Klein, T., Thu, H. P. & Walther, T. (2018). A Comparison of Volatility, Correlation, and Portfolio Performance. *International Review of Financial Analysis*, 59, pp. 105–116.

Klein, M., Gross, J. & Sandner, P. (2020). *The Digital Euro and the Role of DLT for Central Bank Digital Currencies*. Frankfurt School Blockchain Center.

Kristoufek, L. (2015). What are the main drivers of the Bitcoin price? Evidence from wavelet coherence analysis. *PLoS ONE*, 10 (4).

Kunschke, D. & Henkelmann, S. (2019). Germany. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 291–303.

López-Ibor, A., Stöger, P. & Jin, Z. (2019). Spain. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 437–441.

Lovegrove, S. & Weatherill, A. (2019). United Kingdom. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 468–477.

Lowndes, F., Solá M. & Lima da Silva, J. (2019). Portugal. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 402–410.

- McGinnis, J. O. (2020). Bitcoin's nature and its future. *Harvard Journal of Law & Public Policy*, 43 (1), pp. 59–66.
- Naimy, V. Y. & Hayek, M. R. (2018). Modelling and predicting the Bitcoin volatility using GARCH models. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 8 (3), pp. 197–215.
- Nakamoto, S. (2009). *Bitcoin: A peer-to-peer Electronic Cash System*. Recuperado el 18 de febrero de 2020 en <<https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>>
- Perchet, C., Loget, J. & Daniel S. (2019). France. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 282–290.
- PlanB (2019). *Modeling Bitcoin Value with Scarcity*. Recuperado el 18 de marzo de 2020 en <<https://medium.com/@100trillionUSD/modeling-bitcoins-value-with-scarcity-91fa0fc03e25>>
- Reeves, P. & Willcock, G. (2019). Australia. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 197–207.
- Segendorf, B. (2014). What is Bitcoin. *Sveriges Riksbank Economic Review*, 2, pp. 71–87.
- Selgin, G., (2015). Synthetic commodity money. *Journal of Financial Stability* 17, pp. 92–99.
- Shahzad, S.J.H., Bouri, E., Roubaud, D., Kristoufek, L. & Lucey, B. (2019). Is Bitcoin a better safe-haven investment than gold and commodities? *International Review of Financial Analysis* 63, pp. 322–330.
- Strizh, V., Dmitriev, D. & Kiseleva, A. (2019). Russia. *Global Legal Insights – Blockchain & Cryptocurrency Regulation*, 1, pp. 411–418.
- Stroukal, D. (2018). Can Bitcoin become money? Its money functions and the regression theorem. *International Journal of Business and Management*, 4 (1), pp. 36–53.
- Taleb, A. (2012). *Antifragile: Things That Gain from Disorder. Time and Fragility*. Random House, New York.

The World Bank (2018). *Europe and Central Asia Economic Update, May 2018: Cryptocurrencies and Blockchain*. Recuperado el 10 de marzo de 2020 en <<http://hdl.handle.net/10986/29763>>

Troster, V., Tiwari, A. K., Shahbaz, M. & Macedo, D. N. (2018). Bitcoin returns and risk: A general GARCH and GAS analysis. *Finance Research Letters*, 30, pp. 187–193.

Tulcanaza, A. B. (2018). Bitcoin: Its influence on the global World and its relationship with the stock exchange. *Revista Chakiñan*, 5, pp. 54–72.

Unión Europea (2015). Directiva (UE) 2015/849 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de mayo de 2015 relativa a la prevención de la utilización del sistema financiero para el blanqueo de capitales o la financiación del terrorismo, y por la que se modifica el Reglamento (UE) no 648/2012 del Parlamento Europeo y del Consejo, y se derogan la Directiva 2005/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y la Directiva 2006/70/CE de la Comisión, 5 de Junio de 2015, pp. 73–117. Recuperado el 16 de marzo de 2020 en <<https://www.boe.es/doue/2015/141/L00073-00117.pdf>>

Unión Europea (2018). Directiva (UE) 2018/843 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva (UE) 2015/849 relativa a la prevención de la utilización del sistema financiero para el blanqueo de capitales o la financiación del terrorismo, y por la que se modifican las Directivas 2009/138/CE y 2013/36/UE, 19 de Junio de 2018, pp. 43–74. Recuperado el 16 de marzo de 2020 en <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0843>>

United States Geological Survey (2020). Mineral Commodity Summaries 2020: U.S. Geological Survey. Recuperado el 3 de junio de 2020 en <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>>