

Estado del arte en predicción de series temporales

J.J. Asensio, P.A. Castillo

Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores
ETSIIT, CITIC-UGR
Universidad de Granada, España
{asensio, pacv}@ugr.es

Resumen bonito abstract test

1. Introducción

Una serie temporal es una secuencia de observaciones dispuestas a intervalos regulares de aparición. Existen multitud de ejemplos donde se registran datos de esta forma, por citar algunos: precios de acciones en bolsa, temperatura mínima y máxima de cada día, accidentes domésticos... etc.

Aquí se destacan los trabajos de investigación publicados en revistas patrocinadas por el Instituto Internacional de Predictores (IIF), aunque también se cubren publicaciones clave de otras revistas. Se ofrece así una guía selectiva para la literatura en predicción de series temporales, cubriendo el periodo 1982-2005 y resumiendo cerca de 940 artículos que incluyen aproximadamente 340 artículos del IIF. También se revisan artículos y libros clave publicados en otros sitios que han sido altamente influyentes para varios desarrollos en este campo. Los trabajos referidos comprenden 380 artículos de revista y 20 libros y monografías.

Los artículos se han clasificado primero de acuerdo a los modelos introducidos en la literatura de series temporales, en lugar de hacerlo respecto a los métodos. Por ejemplo, los métodos bayesianos en general pueden aplicarse a todos los modelos. Los artículos que no conciernen con un modelo particular fueron entonces clasificados atendiendo a los diferentes problemas que abordan (medidas de precisión, combinación).

Puede haber artículos que no aparezcan o que sean citados por otros autores, aunque esto no significa que no sean importantes. Esta revisión es un breve recorrido histórico de los principales desarrollos.

2. Alisado exponencial

2.1. Preámbulo

En 1981, los métodos de alisado exponencial a menudo eran considerados como un conjunto de técnicas especiales para extrapolar varios tipos de series

temporales univariantes. Si bien los métodos de alisado exponencial eran ampliamente utilizados en la industria y los negocios, habían recibido poca atención por parte de los estadísticos y no tenían un fundamento estadístico bien desarrollado. Estos métodos se originaron en las décadas 50 y 60 con el trabajo de Brown (1959, 1963) [1] [2], Holt (1957, reimpreso en 2004)[3], y Winters (1960) [4]. Pegels (1969) [5] proporcionó una clasificación sencilla pero útil de la tendencia y los patrones estacionales dependiendo de si eran aditivos (lineales) o multiplicativos (no lineales).

Muth (1960) [6] fue el primero en sugerir una base estadística para el alisado exponencial simple (SES) demostrando que proporcionaba la predicción óptima para el camino aleatorio con ruido. Los siguientes pasos para poner en un marco estadístico el alisado exponencial fueron proporcionados por Box y Jenkins (1970), Roberts (1982)[7], y Abraham y Ledolter (1983, 1986) [8][9], quienes mostraron que algunas predicciones de alisado exponencial lineales resultan como casos especiales de los modelos ARIMA. Sin embargo, estos resultados no se extienden a cualquier método de alisado exponencial no lineal.

Los métodos de alisado exponencial recibieron un impulso debido a dos artículos publicados en 1985, los cuales establecieron la base para gran parte del trabajo posterior en el área. En primer lugar, Gardner (1985) [10] realizó una revisión exhaustiva y una síntesis del trabajo en alisado exponencial hasta la fecha y extendió la clasificación de Pegels para incluir tendencia amortiguada. Este artículo reunió gran cantidad del trabajo existente lo que estimuló el uso de estos métodos y promovió más trabajos de investigación al respecto. Posteriormente ese mismo año, Snyder (1985) [11] demostró que SES podría ser considerado como una forma resultante de una innovación del modelo de espacio de estados (modelo con una única fuente de error). Aunque esta revelación fue en gran parte inadvertida entonces, en años recientes ha proporcionado la base para una gran cantidad de trabajos en modelos de espacio de estados en los que subyacen los métodos de alisado exponencial.

La mayor parte del trabajo desde 1980 ha incluido el estudio de las propiedades empíricas de los métodos (Bartolomei & Sweet, 1989 [12]; Makridakis & Hibon, 1991 [13]), propuestas para nuevos métodos de estimación o inicialización (McClain, 1988 [14]; Sweet & Wilson, 1988 [15]), o ha estado relacionado con modelos estadísticos en los que se considera que subyacen los métodos (McKenzie, 1984 [16]).

Los métodos de alisado multiplicativo de Taylor (2003)[17] proporcionan los únicos métodos de alisado exponencial genuinamente nuevos. durante este periodo. Por supuesto, hay habido numerosos estudios que aplican métodos de alisado exponencial en varios contextos incluyendo componentes de computadores (Gardner, 1993 [18]) , pasajeros de vuelo (Grubb & Masa, 2001 [19]), y planificación de producción (Miller & Liberatore, 1993 [20]).

La taxonomía de Hyndman, Koehler, Snyder, y Grose (2002 [21] extendida por Taylor, 2003 [17]) proporciona una categorización útil para describir la variedad de métodos. Cada método se componen de una de cinco tipos de tendencia (ninguna, aditiva, aditiva alisada, multiplicativa y multiplicativa alisada) y uno

de tres tipos de estacionalidad (ninguna, aditiva y multiplicativa). Por tanto, hay 15 métodos diferentes, donde entre los más conocidos está SES (sin tendencia ni estacionalidad), el método lineal de Holt (tendencia aditiva, sin estacionalidad), el método aditivo de Holt-Winters (tendencia aditiva y estacionalidad aditiva), y el método no lineal de Holt-Winters (tendencia aditiva y estacionalidad multiplicativa).

2.2. Variantes

Se han propuesto numerosas variaciones de los métodos originales. Por ejemplo, Carreno y Madinaveitia (1990) [22] y Williams y Miller (1999) [23] propusieron modificaciones para tratar discontinuidades, y Rosas y Guerrero (1994) [24] consideraron predicciones con alisado exponencial sujetas a una o más restricciones. También hay variantes por cómo y cuándo las componentes estacionales deberían ser normalizadas. Lawton (1998) [25] abogó por una renormalización de los índices estacionales para cada periodo de tiempo, puesto que elimina sesgo en las estimaciones de los componentes estacionales y de nivel. Roberts (1982) [7] y McKenzie (1986) [26] dieron esquemas ligeramente diferentes de normalización. Archibald y Koehler (2003) [27] desarrollaron nuevas ecuaciones de normalización que eran más sencillas de usar dando el mismo grado de predicción que los métodos originales. Una variante útil a mitad de camino entre SES y el método de Holt, es SES con desviación. Es equivalente al método de Holt con el parámetro de tendencia a cero. Hyndman y Billah (2003) [28] mostraron que este método también era equivalente al método Theta de Assimakopoulos y Nikolopoulos (2000) [29], cuando el parámetro de desviación es igual a la mitad de la pendiente de una tendencia lineal ajustada a los datos. El método Theta dio un rendimiento extremadamente bueno en la competición M3, aunque el por qué esta particular elección de modelo y parámetros era buena todavía no se ha determinado. Ha habido extraordinariamente poco trabajo en desarrollar versiones multivariadas de los métodos de alisado exponencial para predicción. Una excepción notable es Pfeiffermann y Allon (1989) [30] quienes consideraron datos de turismo israelí. El SES Multivariado se usa para gráficos de control de procesos (Pan, 2005) [31], donde es llamado “medias móviles multivariadas ponderadas exponencialmente”, pero aquí la cuestión no es predicción.

2.3. Modelos de espacio de estados

Ord, Koehler y Snyder (1997) [32] a partir del trabajo de Snyder (1985)[11] propusieron una clase de modelos de espacio de estado de innovaciones en la que se puede considerar que subyacen algunos métodos de alisado exponencial. Hyndman et al (2002) [21] y Taylor (2003) [17] amplían esto para incluir los 15 métodos de alisado exponencial. De hecho, Hyndman et al (2002) [21] propusieron dos modelos de espacio de estado para cada método, correspondientes a los casos de error aditivo y multiplicativo. Estos modelos no son los únicos, y otros modelos relacionados para los métodos de alisado exponencial se presentaron en Koehler, Snyder y Ord (2001) [33] y Chatfield, Koehler, Ord y Snyder (2001)

[34]. Desde hace tiempo se conoce que algunos modelos ARIMA dan predicciones equivalentes a los métodos lineales de alisado exponencial. La importancia del trabajo reciente en modelos de espacio de estado de innovaciones es que los métodos de alisado exponencial no lineales también pueden derivarse de modelos estadísticos.

2.4. Selección del modelo

Gardner y McKenzie (1988) [35] proporcionaron algunas reglas sencillas basadas en las varianzas de series temporales diferenciadas para elegir un método de alisado exponencial apropiado. Tashman y Kruk (1996) [36] compararon estos resultados con otros propuestos por Collopy y Armstrong (1992) [37] y un enfoque basado en el criterio de información bayesiano (BIC). Hyndman et al. (2002) [21] también propuso un enfoque basado en criterio de información, pero usando los modelos de espacio de estado subyacentes.

2.5. Robustez

El buen rendimiento de la predicción de los métodos de alisado exponencial ha sido estudiado por varios autores. Satchell y Timmermann (1995) [38] y Chatfield et al. (2001) [34] mostraron que SES es óptimo para un rango amplio de procesos generadores de datos. En un pequeño estudio de simulación, Hyndman (2001) [39] mostró que SES rendía mejor los modelos ARIMA de primer orden porque no está tan sujeto a problemas de selección de modelo, especialmente cuando los datos no siguen una distribución normal.

2.6. Intervalos de predicción

Una de las críticas a los métodos de alisado exponencial a principios de los 80 era que no había forma de producir intervalos de predicción para las predicciones. La primera aproximación analítica a este problema fue asumir que las series eran generadas mediante funciones deterministas del tiempo más ruido blanco (Brown, 1963 [2]; Gardner, 1985 [10]; McKenzie, 1986 [26]; Sweet, 1985 [40]). En tal caso, sería mejor usar un modelo de regresión en lugar de los métodos de alisado exponencial. Newbold y Bos (1989) [41] criticaron fuertemente cualquier enfoque basado en esta hipótesis. Otros autores buscaron intervalos de predicción mediante la equivalencia entre los métodos de alisado exponencial y los modelos estadísticos. Johnston y Harrison (1986) [42] establecieron variantes de predicción para los métodos SES, y los métodos de Holt de alisado exponencial para modelos de espacio de estado con múltiples fuentes de error. Yar y Chatfield (1990) [43] obtuvieron intervalos de predicción para el método aditivo de Holt-Winters derivando el equivalente método ARIMA subyacente. Chatfield y Yar (1991) [44] discutieron intervalos aproximados de predicción para el método multiplicativo de Holt-Winters, asumiendo que los errores en las predicciones a un paso fueran independientes. Koehler et al. (2001) [33] también

derivó una fórmula aproximada para la previsión de varianza para el método multiplicativo de Holt-Winters, distinguiéndose de Chatfield y Yar (1991) [44] solamente en cómo la desviación estándar del error en la predicción a un paso era estimada. Ord et al (1997) [32] y Hyndman et al. (2002) [21] usaron el modelo de espacio de innovación subyacente para simular rutas de muestras futuras, y de este modo obtuvieron intervalos de predicción para todos los métodos de alisado exponencial. Hyndman, Koehler, Ord y Snyder (2005) [45] usaron modelos de espacio de estado para derivar intervalos de predicción analíticos para 15 de los 30 métodos, incluyendo todos los métodos usados habitualmente. Proporcionaron el enfoque algebraico más comprensible hasta la fecha para manejar el problema de la distribución de predicción para la mayoría de los métodos de alisado exponencial.

2.7. Espacio de parámetros y propiedades del modelo

Una práctica habitual es restringir los parámetros de alisado al rango de 0 a 1. Sin embargo, ahora que los modelos estadísticos subyacentes están disponibles, el espacio natural (invertible) de parámetros se puede usar en su lugar. Archibald (1990) [46] mostró que es posible para parámetros de alisado dentro de los intervalos usuales producir modelos no invertibles. Consecuentemente, al predecir, el impacto del cambio en los valores pasados de la serie no es despreciable. Intuitivamente, tales parámetros producen predicciones pobres y deteriora el rendimiento de la predicción. Lawton (1998) [25] también discutió este problema.

3. Modelos ARIMA

3.1. Preámbulo

Los primeros intentos de estudiar series temporales, particularmente en el siglo 19, estaban generalmente caracterizados por la idea de un mundo determinista. Fue la mayor contribución de Yule (1927) [47] la que impulsó la noción de aleatoriedad en series temporales postulando que cada serie temporal puede ser considerada como la realización de un proceso estocástico. Basado en esa sencilla idea, se desarrolló desde entonces un gran número de métodos de series temporales. Slutsky, Walker, Yaglom y Yule formularon el concepto de los modelos auto-regresivos (AR) y media móvil (MA). El teorema de la descomposición de Wold condujo a la formulación y solución del problema de predicción lineal de Kolmogorov (1941) [48]. Desde entonces, una gran cantidad de literatura ha aparecido en el área de series temporales, tratando estimación de parámetros, identificación, comprobación de modelos y predicción, véase Newbold (1983) [49] para un estudio anterior.

La publicación *Time Series Analysis: Forecasting and Control* de Box y Jenkins (1970) [50] integró el conocimiento existente. Además, estos autores desarrollaron una ciclo coherente, versátil e iterativo en tres etapas para la identificación, estimación y verificación de series temporales (conocido como el enfoque Box-Jenkins). El libro ha tenido un enorme impacto en la teoría y práctica moderna

de análisis y predicción de series temporales. Con la llegada de los ordenadores, se popularizó el uso de los modelos ARIMA y se extendió a muchas áreas de la ciencia. De hecho, la predicción de series temporales discretas mediante modelos ARIMA univariantes, modelos de función de transferencia (regresión dinámica), y modelos ARIMA multivariados han generado bastantes artículos en IJF. A menudo estudios de naturaleza empírica, que usan uno o varios métodos/modelos como punto de referencia para comparar.

(incluir tabla)

3.2. Univariado

El éxito de la metodología de Box-Jenkins se basa en el hecho de que los modelos pueden imitar el comportamiento de los diversos tipos de series y sin requerir muchos parámetros a estimar en la elección final del modelo. Sin embargo, a mediados de los años sesenta, la selección de un modelo era en gran medida una cuestión subjetiva del investigador, no había ningún algoritmo para especificar un modelo único. Desde entonces, muchas técnicas y métodos han surgido para añadir rigor matemático en el proceso de búsqueda de un modelo ARMA, incluyendo el criterio de información Akaike (AIC), el error de predicción final de Akaike (FPE) y el criterio de información bayesiano (BIC). A menudo, estos criterios se reducen a la minimización de errores de predicción a un paso (en la muestra), con un término de penalización para el sobreajuste. FPE también ha sido generalizado para predicción a varios pasos (véase, por ejemplo, Bhansali, 1996 [51] y Bhansali, 1999 [52]), pero esta generalización no ha sido utilizada en el área aplicada. Este también parece ser el caso de criterios basados en principios de validación cruzada y validación por división muestral (véase, por ejemplo, West, 1996 [53]), haciendo uso de errores de predicción fuera-de-muestra; véase Peña y Sánchez (2005) [54] para un enfoque relacionado a considerar.

Existen diferentes métodos para estimar los parámetros de un modelo ARMA (véase Box et al., 1994 [55]). Aunque estos métodos son asintóticamente equivalentes, en el sentido de que las estimaciones tienden a la misma distribución normal, hay grandes diferencias en las propiedades con muestra finitas. En un estudio comparativo de los paquetes de software, Newbold, Agiakloglou y Miller (1994) [56] mostraron que esta diferencia puede ser muy sustancial y, como consecuencia, puede influir en las predicciones. En consecuencia, recomendaron el uso de máxima verosimilitud completa. El efecto de que los errores de estimación para los parámetros limitan las predicciones también fue algo observado por Zellner (1971) [57]. Él utilizó un análisis bayesiano y derivó la distribución predicha de observaciones futuras tratando los parámetros del modelo ARIMA como variables aleatorias. Más recientemente, Kim (2003) [58] consideró una predicción y estimación de los parámetros de modelos AR con pequeñas muestras. Encontró que las estimaciones de parámetros con sesgo corregido producían predicciones más precisas que las de mínimos cuadrados. Landsman y Damodaran (1989) [59] presentaron la evidencia de que la estimación de parámetros de ARIMA James-Stein mejoraba la precisión de predicción con respecto a otros métodos, bajo el criterio de MSE.

Si una serie temporal se sabe que sigue un modelo ARIMA univariado, las predicciones que usan observaciones desagregadas son, en términos de MSE, al menos tan buenas como aquellas que usan observaciones agregadas. Sin embargo, en aplicaciones prácticas, existen otros factores a considerar, como valores perdidos en series desagregadas. Ledolter (1989) [60] y Hotta (1993) [61] analizaron el efecto producido de un outlier aditivo en el intervalo de predicción cuando se estiman los parámetros del modelo ARIMA. Cuando el modelo es estacionario, Hotta y Cardoso Neto (1993) mostraron que la pérdida de eficiencia usando datos desagregados no era alta, incluso si el modelo no es conocido. Por tanto, la predicción podría hacerse tanto con modelos desagregados como agregados.

El problema de añadir información externa (prior) en las predicciones de ARIMA univariado fue considerado por Cholette (1982) [62], Guerrero (1991) [63] y de Alba (1993) [64]).

Como alternativa a la metodología de ARIMA univariado, Parzen (1982) [65] propuso la metodología ARARMA. La idea clave es que una serie temporal es transformada de un filtro AR de memoria larga, a un filtro de memoria corta, evitando así un operador de diferenciación más duro. Además, se usa una fase de identificación diferente al convencional de Box-Jenkins. En la competición M (Makridakis et al., 1982 [66]), los modelos ARARMA consiguieron el MAPE más bajo para horizontes de predicción mayores. Por lo tanto, es sorprendente encontrar que, a parte de artículo de Meade y Smith (1985) [67], la metodología ARARMA todavía no haya despegado en el área aplicada. Su valor definitivo, quizá pueda ser juzgado mediante el estudio de Meade (2000), quien comparó la capacidad de predicción de un método ARARMA automático y no automático.

El modelado automático de ARIMA univariado, ha mostrado una capacidad de predicción a un paso tan precisa como la de otros métodos competentes (Hill y Fildes, 1984, Liber, 1984, Poulos et al., 1987 y Texter y Ord, 1989). Varios proveedores de software han implementado métodos de predicción automáticos de series temporales (incluso métodos multivariados); véase Geriner y Ord (1991) [68], Tashman y Leach (1991) [69], y Tashman (2000) [70]. A menudo estos métodos actúan como caja negra. La tecnología de sistemas expertos (Mélard & Pasteels, 2000) se puede usar para evitar este problema. Algunas directrices en la elección de un método de predicción automático se da en Chatfield (1988) [71].

Mejor que adoptar un modelo AR para todos los horizontes de predicción, Kang (2003) [72] investigó empíricamente el caso de seleccionar un modelo AR de forma diferenciada para cada horizonte en predicciones multi-paso. El rendimiento de predicción del procedimiento multi-paso parece depender entre otras cosas del criterio de selección de orden óptimo, los periodos de predicción, los horizontes de predicción y la serie a predecir.

3.3. Función de transferencia

La identificación de modelos de función de transferencia puede ser difícil cuando hay más de una variable de entrada. Edlund (1984) [73] presentó un método en dos pasos para identificación de una función respuesta impulso cuando

varias variables de entrada están correladas. Koreisha (1983) [74] estableció varias relaciones entre funciones de transferencia, implicaciones causales y especificación de modelo econométrico. Gupta (1987) [75] identificó los principales problemas en las comprobaciones de causalidad. Usando análisis de componentes principales, del Moral y Valderrama (1997) [76] sugirieron una representación parsimoniosa de modelo de función de transferencia. Krishnamur, Narayan y Raj (1989) [77] mostraron cómo estimaciones más precisas del impacto de las intervenciones en modelos de función de transferencia se pueden obtener usando una variable de control.

3.4. Multivariado

El modelo de vector ARIMA (VARIMA) es una generalización multivariada del modelo univariado ARIMA. Las características de población de procesos VARMA parecen haber sido derivados primero por Quenouille (1957) [78], aunque el software para su implementación llegó a estar disponible en los 80 y 90. Puesto que los modelos VARIMA pueden acomodar supuestos de exogeneidad y de relaciones de contemporaneidad, ofrecen nuevos retos a los encargados de predecir y elaborar de políticas. Riise y Tjostheim (1984) [79] mostraron como los filtros de suavizado pueden construirse dentro de los modelos VARMA. El alisado previene fluctuaciones irregulares en series temporales explicativas al migrar las predicciones de la serie dependiente. Para determinar el máximo horizonte de predicción para procesos VARMA, DeGooijer y Klein (1991) [80] establecieron las propiedades teóricas de las predicciones y el error de predicción acumulado a varios pasos. Lütkepohl (1986) [81] estudió los efectos de la agregación temporal y el muestreo sistemático en predicción, suponiendo que la variable desagregada (estacionaria) sigue un proceso VARMA de orden desconocido. Posteriormente, Bidarkota (1998) [82] consideró el mismo problema pero con las variables observadas integradas en lugar de estacionarias.

Los vectores de auto-regresión (VAR) constituyen un caso especial de una clase más general de modelos VARMA. En esencia, un modelo VAR es una aproximación flexible a la forma reducida de una variedad amplia de modelos econométricos dinámicos. Los modelos VAR se pueden especificar de varias formas. Funke (1990) [83] presentó 5 especificaciones diferentes de VAR y comparó sus rendimientos de predicción usando series mensuales de producción industrial. Dhrymes y Thomakos (1989) [84] disertó cuestiones relacionadas con la identificación de VARs estructurales. Hafer y Sheedhan (1989) [85] mostraron el efecto de cambios en la estructura del modelo en las predicciones de VAR. Ariño y Franses (2000) [86] dieron expresiones explícitas para predicciones VAR por niveles; véase también Wieringa y Horváth (2005) [87]. Hansson, Jansson y Löf (2005) [88] usaron un modelo de factor dinámico como punto de partida para obtener predicciones a partir de VARs parametrizados parsimoniosamente.

En general, los modelos VAR tienden a sufrir sobreajuste con demasiados parámetros libres y no significativos. Como resultado, estos modelos pueden dar pobres predicciones fuera de muestra, incluso aunque el ajuste en las muestras

sea bueno; véase Liu, Gerlow y Irwin (1994) [89] y Simkins (1995) [90]. En lugar de restringir algunos parámetros como habitualmente se hace, Litterman (1986) [91] y otros impusieron una distribución preferente en los parámetros, expresando la idea de que muchas variables económicas se comportan como un camino aleatorio. Los modelos BVAR se han usado principalmente para predicción macroeconómica (Artis y Zhang, 1990 [92], Ashley, 1988 [93], Holden & Broomhead, 1990 [94] y Kunst & Neusser, 1986 [95]), para predicción de cuotas de mercado (Ribeiro Ramos, 2003 [96]), predicción del mercado laboral (LeSage y Magura, 1991 [97]), para proyección de negocios (Spencer, 1993 [98]) o para predicción de economía local (LeSage, 1989 [99]). Kling y Bessler (1985) [100] compararon predicciones fuera de muestra de varios métodos para series temporales multivariadas bien conocidos de la época, incluyendo el modelo BVAR de Litterman.

El concepto de cointegración de Engle y Granger (1987) [101] ha generado varias cuestiones interesantes en la capacidad de predicción de los modelos de corrección de error (ECMs) frente a VARs y BVARs no restringidos. Shoesmith (1992 [102], 1995 [103]), Tegene y Kuchler (1994) [104] y Wang y Bessler (2004) [105] dieron evidencias empíricas para sugerir que los ECMs mejoran el rendimiento de VARs por niveles, particularmente en horizontes de predicción mayores. Shoesmith (1995) [103], y posteriormente Villani (2001) [106], también mostraron cómo el enfoque bayesiano de Litterman (1986) [91] podía mejorar la predicción con VARs cointegrados. Reimers (1997) [107] estudió el rendimiento de predicción de procesos de series temporales vector cointegradas estacionalmente usando un ECM. Poskitt (2003) [108] disertó sobre la especificación de sistemas VARMA cointegrados. Chevillon y Hendry (2005) [109] analizó la relación entre estimaciones multi-paso directas de VARs estacionarios frente a no estacionarios y respectivas precisiones de predicción.

4. Estacionalidad

El enfoque más antiguo para controlar la estacionalidad en series temporales es extraerla usando un procedimiento de descomposición como el método X-11. En los últimos 25 años este método y sus variantes (incluyendo versiones más reciente, X-12-ARIMA, Findley, Monsell, Bell, Otto y Chen, 1998 [110], se han estudiado de forma extensa.

Una línea de investigación considera el efecto de usar predicción como parte del método de descomposición estacional. Por ejemplo Dagum (1982) [111] y Huot, Chiu y Higginson (1986) [112] observaron el uso de predicción en X-11-ARIMA para reducir el tamaño de las revisiones en el ajuste estacional de los datos, y Pfeiffermann, Morry y Wong (1995) [113] exploraron el efecto de las predicciones en la varianza de los valores ajustados de tendencia y estacionalidad.

Quenneville, Ladiray y Lefrançois (2003) [114] con otro enfoque observaron las predicciones implícitas mediante los filtros de medias móviles asimétricos del método x-11 y sus variantes.

Un tercer enfoque fue ver la efectividad de predicción usando datos ajustados estacionalmente a partir de un método de descomposición estacional. Miller y Williams, 2003 [115] y 2004 [116] mostraron que se obtenía la mayor precisión de predicción cuando se encogía la componente estacional hacia cero. Los comentarios sobre este último artículo dieron sugerencias relacionadas con la implementación de esta idea.

Además de trabajar en el método X-11 y sus variantes, también se han desarrollado varios métodos nuevos para el ajuste estacional, entre los que destaca el enfoque basado en modelo de TRAMO-SEATS (Gómez y Maravall, 2001 [117] y Kaiser y Maravall 2005 [118]) y el método no paramétrico STL (Cleveland, Cleveland, McRae y Terpenning, 1990 [119]). Otra propuesta ha sido el uso de modelos sinusoidales (Simmons, 1990 [120]).

En la predicción de varias series similares, Withycombe (1989) [121] mostró que puede ser más eficiente estimar una componente estacional combinada para el grupo de series, en lugar de usar sus patrones individuales. Bunn y Vassilopoulos (1993) [122] demostró cómo usar agrupamiento para formar grupos apropiados para esta situación, y Bunn y Vassilopoulos (1999)[123] introdujo algunos estimadores mejorados para los índices de grupo estacional.

A principio de los 80, las pruebas de raíz unitarias acababan de ser inventadas y las pruebas de raíz unitaria estacional estaban por llegar en breve. Posteriormente hubo un trabajo considerable en el uso e implementación de las pruebas de raíz unitaria estacional incluyendo Hylleberg y Pagan (1997) [124], Taylor (1997)[125] y Franses y Koehler (1998) [126]. Paap, Franses y Hoek (1997) [127] y Clements y Hendry (1997) [128] estudió el rendimiento de predicción de modelos con pruebas de raíz especialmente en el contexto de los cambios de nivel.

Algunos autores han advertido contra el uso extendido de modelos de raíz unitaria estacional estándar para series temporales económicas. Osborn (1990) [129] argumentó que las componentes estacionales deterministas son más habituales en series económicas que en estacionalidad estadística. Franses y Romijn (1993) [130] sugirió que las raíces estacionales en modelos periódicos resultan en mejores predicciones. Los modelos de series temporales periódicas fueron también exploradas por Wells (1997) [131], Herwartz (1997) [132] y Novales y de Fruto (1997) [133], los cuales encontraron que los modelos periódicos pueden conducir a una mejora en el rendimiento de la predicción comparados con modelos no periódicos bajo algunas condiciones. La predicción de procesos ARMA periódicos multivariados fue considerada por Ullah (1993) [134].

Varios artículos han comparado empíricamente los modelos estacionales. Chen (1997) [135] exploró la robustez de un modelo estructural, un modelo de regresión con estacionalidad, un modelo ARIMA, y el método de Holt-Winters, y encontró que los dos últimos daban predicciones relativamente robustas cuando el modelo no estaba completamente especificado. Noakes, McLeod, y Hipel (1985) [136], Albertson y Aylen (1996) [137], Kulendran y King (1997) [138] y Franses y van Dijk (2005) [139] compararon todos el rendimiento de predicción de varios modelos estacionales aplicados a datos reales. El modelo con mejor predicción variaba a lo largo del estudio, dependiendo de qué modelo fuera usado y

la naturaleza de los datos. Parece no haber consenso todavía en qué condiciones se puede preferir un modelo u otro.

5. Espacio de estado y modelos estructurales y el filtro de Kalman

A principios de 1980, los modelos de espacio de estado acababan de empezar a usarse por estadísticos para predecir series temporales, aunque las ideas ya habían estado presentes en la literatura de ingeniería desde el trabajo innovador de Kalman (1960) [140]. Los modelos de espacio de estado proporcionan un marco unificado en el que se pueda escribir cualquier modelo lineal de serie temporal. La contribución clave de predicción de Kalman (1960) fue dar un algoritmo recursivo (conocido como el filtro de Kalman) para computar las predicciones. Los estadísticos empezaron interesarse por los modelos de espacio de estado cuando Schweppe (1965) [141] mostró que el filtro de Kalman proporciona un método eficiente para computar los errores de la predicción a un paso y su varianza asociada necesaria para producir la función de probabilidad. Shumway y Stoffer (1982)[142] combinaron el algoritmo EM con el filtro de Kalman para dar un enfoque general para predecir series temporales usando modelos de espacio de estado, incluyendo la posibilidad de observaciones inexistentes.

Una clase particular de modelos de espacio de estado, conocidos como *modelos lineales dinámicos* (DLM) fue introducida por Harrison y Stevens (1976) [143], quienes también propusieron un enfoque bayesiano para la estimación. Fildes (1983) [144] comparó las predicciones obtenidas usando el método de Harrison y Stevens con métodos más sencillos como el alisado exponencial concluyendo que la complejidad adicional no conducía a una mejora del rendimiento de predicción. El enfoque de modelado y estimación de Harrison y Stevens fue mejorado por (West, Harrison y Migon (1985) [145] y West y Harrison (1989) [146]. Harvey, 1984 [147] y 1989 [148] amplió esta clase de modelos y siguió un enfoque no bayesiano para la estimación. También renombró los modelos como *modelos estructurales*, aunque posteriormente usaría el término *modelos de componentes no observadas*. Harvey (2006) [149] proporciona una revisión comprensible y una introducción para esta clase de modelos incluyendo variaciones no gaussianas y en tiempo continuo.

Estos modelos poseen muchas similitudes con los métodos de alisado exponencial, pero tienen múltiples fuentes de error aleatorio. En particular, el *modelo estructural básico* (BSM) es similar a método de Holt-Winters para datos estacionales e incluye componentes de nivel, tendencia y estacionalidad.

Ray (1989) [150] discutió la tasa de convergencia para el crecimiento lineal del modelo estructural y mostró que los estados iniciales (elegidos de forma subjetiva normalmente) tenían un impacto no despreciable en las predicciones. Harvey y Snyder (1990) [151] propusieron algunos modelos estructurales de tiempo continuo para predecir el tiempo de espera demandado para control de inventario. Proietti (2000)[152] discutió variaciones del BSM, comparando sus propiedades y evaluando las predicciones resultantes.

Los modelos estructurales no gaussianos, han sido objeto de numerosos artículos, empezando por el modelo de potencia estable de Smith (1979) [153] con posterior desarrollo por West et al. (1985) [145]. Por ejemplo, estos modelos fueron aplicados a la predicción de series temporales de dimensiones continuas por Grundwald, Raftery y guttorp (1993) [154] y para recuentos por Harvey y Fernandes (1989)[155]. Sin embargo, Grunwald, Hamza y Hyndman (1997)[156] mostraron que la mayoría de los modelos habitualmente usados tienen una sustancial imperfección en la trayectoria de muestras convergiendo a una constante cuando el espacio de muestras es menor que la línea real completa, haciéndolas inadecuadas para predicción de intervalos.

Otra clase de modelos de espacio de estado, conocida como *modelos balanceados de espacio de estado*, se ha usado principalmente para predicción de series temporales macro-económicas. Mittnik (1990)[157] proporcionó un estudio de esta clase de modelos, y Vinod y Basu (1995) [158] obtuvo predicciones para el consumo, ingresos y tasas de interés usando estos modelos. Estos sólo tienen una única fuente de error aleatorio y generalizan otros modelos como ARMAX, ARMA y modelos con retardo racional distribuido. Una clase de espacio de estados relacionada son los modelos de *fuentes únicas de error* en los que subyacen los métodos de alisado exponencial.

A parte de estos desarrollos metodológicos, han habido varios artículos proponiendo modelos innovadores de espacio de estados para resolver problemas prácticos de predicción. Entre ellos, Coomes (1992) [159] quien usó un modelo para predecir empleos según la industria para regiones locales y Patterson (1995) [160] quien usó un enfoque de espacio de estado para predicción de ingresos personales disponibles.

Los libros de Harvey (1989) [148], West y Harrison (1989) [146] y Durbin y Koopman (2001) [161] han tenido un impacto sustancial en la literatura de series temporales en cuanto a investigación de modelos de espacio de estado, filtrado de Kalman y modelos estructurales discretos / continuos en tiempo.

6. Modelos no lineales

6.1. Preámbulo

Comparado con el estudio de series temporales lineales, el desarrollo de análisis y predicción no lineal de series temporales todavía está en su infancia. El comienzo se atribuye a Volterra (1930) [162]. Mostró que cualquier función continua no lineal en t podría ser aproximada por una serie finita de Volterra. Wiener (1958) [163] se interesó en las ideas de representación funcional de series y desarrolló el material existente. Aunque las propiedades probabilistas de estos modelos se habían estudiado ampliamente, los problemas de estimación de parámetros, ajuste del modelo y predicción fueron descuidados durante un largo tiempo. Esto puede atribuirse a la complejidad del modelo propuesto por Wiener y sus formas simplificadas como el modelo bilineal (Poskitt y Tremayne, 1986 [164]). En su día, el ajuste de estos modelos conllevaba dificultades de cómputo insuperables.

Aunque la linealidad es un supuesto útil y una herramienta potente en muchas áreas, a finales de los 70 y principios de los 80, los modelos lineales eran insuficientes en muchas aplicaciones reales. Por ejemplo, los ciclos prolongados de tamaño de población animal, (los famosos datos del lince Canadiense), ciclos solares (número anual de manchas solares), flujo de energía y relaciones de amplitud-frecuencia, son ejemplos donde no se adecuan los modelos lineales. Para satisfacer esta demanda, se propusieron modelos no lineales de series temporales útiles durante este mismo periodo. De Gooijer y Kumar (1992) [80] ofrecieron un resumen de los desarrollos en el área al principio de los 90. Estos autores argumentaban que el rendimiento superior en predicción de estos modelos no lineales era irregular.

Un factor que probablemente ha retrasado difusión de publicaciones de predicciones no lineales es que hasta entonces no era posible obtener expresiones analíticas cerradas para predicciones multi-paso. Sin embargo, usando la ley de Chapman-Kolmogorov en principio se pueden obtener mediante complejas integraciones numéricas predicciones de mínimos cuadrados exactas multi-paso. Pemberton (1987) [165] y AL-Qassem y Lane (1989) [166] dieron algunos de los primeros ejemplos de este enfoque. Hoy día, las predicciones no lineales se obtienen mediante simulación Monte Carlo o por *bootstrapping* (remuestreo). El último caso se prefiere al no necesitar suposiciones sobre la distribución del proceso de error.

La monografía de Granger y Teräsvirta (1993) [167] ha impulsado nuevos desarrollos en la estimación, evaluación y selección entre los diferentes modelos de predicción no lineales para series temporales de economía y finanzas. Un buen resumen del estado del arte en se encuentra en IJF Special Issue 20:2 (2004). En su artículo de introducción, Clements, Franses y Swanson (2004) [168] subrayan varios temas para investigación futura. Concluyen que todavía queda mucho por hacer para que los procedimientos no lineales para predicción, estimación y especificación de modelos estén fácilmente disponibles.

6.2. Modelos de cambio de régimen

La clase de modelos no lineales autorregresivos con umbral auto-excitado (SETAR) fue promocionada de forma prominente mediante los libros de Tong, 1983 [169] y 1990 [170]. Estos modelos, los cuales son modelos lineales a trozos, en su forma más básica, han atraído algo de atención en IJF. Clements y Smith (1997) [171] compararon varios métodos para obtener predicciones multi-paso para modelos SETAR univariados discretos. Concluyeron que las predicciones mediante simulación Monte Carlo eran satisfactorias en casos donde se sabe que las perturbaciones en el modelo SETAR vienen de una distribución simétrica. En otro caso se prefiere el método de *bootstrapping*. De Gooijer y Vidiella-i-Anguera (2004) [172] dieron resultados similares para modelos con umbral VAR. Brockwell y Hyndman (1992) [173] obtuvieron predicciones de un paso para modelos con umbral continuos (CTAR). Puesto que el cálculo de predicciones multi-paso a partir de los modelos CTAR involucra integraciones complicadas de mayor

dimensionalidad, el uso práctico de CTAR está limitado. El rendimiento de predicción fuera de muestra de varias variantes de modelos SETAR con respecto a los modelos lineales ha sido objeto de varios artículos en IJF, incluyendo Astatkiw, Watts y Watt (1997) [174], Boero y Marrocu (2004) [175] y Enders y Falk (1998) [176].

Una desventaja del modelo SETAR es que la dinámica cambia de forma discontinua de un régimen a otro. En cambio, un modelo de transición suave (STAR) permite una transición más gradual entre los distintos regímenes. Sarantis (2001)[177] encontró evidencia de que los modelos tipo STAR pueden ser mejores que los modelos lineales autorregresivos y de camino aleatorio para predecir precios de acciones tanto a corto plazo como a medio plazo. El estudio de Bradley y Jansen (2004)[178] parece refutar la conclusión de Sarantis.

Fok, van Dijk y Franses (2005) [179] examinaron la siguiente cuestión clave: ¿Puede un modelo STAR multinivel de datos de panel para series desagregadas mejorar las predicciones de agregados macroeconómicos como ingresos totales o desempleo total?. El modelo STAR propuesto parece merecer la pena investigarse en más detalle puesto que permite que los parámetros que gobiernan el cambio de régimen sean distintos según los estados. Basándose en simulaciones y hallazgos empíricos, los autores afirman que de hecho se pueden conseguir mejoras en las predicciones a un paso.

Franses, Paap, y Vroomen (2004) [180] propusieron un modelo con umbral AR(1) que permite una inferencia plausible sobre valores específicos de los parámetros. La idea clave es que los valores de los parámetros de AR dependen de una variable indicadora dominante. El modelo resultante mejora el rendimiento respecto a otros modelos no lineales cambiantes en tiempo, incluyendo el modelo de cambio de régimen de Markov, en términos de predicción.

6.3. Modelos con coeficiente funcional

Un modelo AR con coeficiente funcional (FCAR o FAR) es un modelo AR en el que los coeficientes AR pueden variar como una función suave de otra variable, como un valor retrasado de la propia serie o una variable exógena. El modelo FCAR incluye los modelos TAR y STAR como casos especiales y es análogo al modelo aditivo generalizado de Hastie y Tibshirani (1991) [181]. Chen y Tsay (1993) [182] propusieron un procedimiento de modelado usando ideas de estadística paramétrica y no paramétrica. El enfoque supone poca información a priori sobre la estructura del modelo sin sufrir la *maldición de la dimensión*; véase también Cai, Fan y Yao (2000) [183]. Harvill y Ray (2005) [184] presentaron resultados de predicción usando modelos univariados y multivariados con coeficiente funcional (V)FCAR. Estos autores limitaron su comparación a tres métodos, el complemento predictivo ingenuo, el predictor bootstrap y el predictor multi-etapa. Tanto los resultados empíricos como las simulaciones indicaban que el método bootstrap daba predicciones ligeramente más precisas. Un área potencialmente útil de investigación futura es saber si la potencia de los modelos VFCAR puede mejorarse usando variables exógenas.

6.4. Redes neuronales

Una red neuronal artificial (ANN) puede ser útil para procesos no lineales que tengan relaciones funcionales desconocidas y por tanto difíciles de ajustar (Darbellay y Slama, 2000 [185]). La idea principal con ANN es que las entradas, o variables dependientes, son filtradas mediante una o más capas ocultas cada una de las cuales consta de nodos antes de alcanzar la variable de salida. La salida intermedia se enlaza a la salida final. Otros modelos son versiones específicas de ANN donde se impone cierta estructura (véase JoF Special Issue 17:5/6 (1998)).

Una de las mayores áreas de aplicación de ANN es predicción; véase Zhang, Patuwo y Hu (1998) [186] y Hippert, Pedreira y Souza (2001) [187] para revisiones de la literatura. Existen numerosos estudios que documentan el éxito de ANN en predicción de datos financieros. Sin embargo, en dos publicaciones de IJF, Chatfield, 1993 [188] y 1995 [189] se cuestionó si las ANNs se habían vendido demasiado como técnicas de predicción milagrosas. Seguidamente algunos artículos documentaron que modelos ingenuos como el de camino aleatorio podían mejorar el rendimiento de ANNs (véase Callen et al., 1996 [190], Church y Curram, 1996 [191], Conejo et al., 2005 [192], Gorr et al., 1994 [193] y Tkacz, 2001 [194]). Estas observaciones son consistentes con los resultados de Adya y Collopy (1998) [195] donde se evalúa la efectividad de predicción basada en ANN para 48 estudios realizados entre 1988 y 1994.

Gorr (1994) [196] y Hill, Marquez, OConnor y Remus (1994) [197] sugirieron que la investigación a seguir debería tratar de definir mejor los límites en que ANN mejora las técnicas tradicionales y viceversa. Varios autores exploran este tema. Hill et al. (1994) [197] advirtió que las ANNs probablemente funcionen mejor para datos financieros con alta frecuencia y Balkin and Ord (2000) [198] también subrayaron la importancia del tamaño de la serie para asegurar resultados óptimos del entrenamiento de la ANN. Qi (2001) [199] señaló que las ANNs probablemente mejoren otros métodos cuando los datos de entrada se mantienen lo más actualizados posible usando modelado recursivo (Olson y Mossman, 2003 [200]).

Un problema general con los modelos no lineales se encuentra en la complejidad de los modelos y su parametrización excesiva. Si se considera realmente importante el principio de parsimonia, es interesante comparar el rendimiento de predicción fuera de muestra de los modelos lineales frente a los no lineales, usando una amplia variedad de criterios de selección de modelo. Esta cuestión fue considerada en bastante profundidad por Swanson y White (1997) [201]. Sus resultados sugirieron que una simple ANN con una única capa oculta *feed-forward*, la cual era muy popular en series temporales econométricas, ofrece una alternativa útil y flexible a modelos lineales de especificación fijada, particularmente para horizontes de predicción mayores de un paso. En contraste con Swanson y White, Heravi, Osborn y Birchenhall (2004) [202] encontraron que los modelos lineales producen predicciones más precisas de producción industrial mensual europea sin ajuste estacional que los modelos de ANN. Ghiassi, Saidane, y Zimbra (2005) [203] presentaron una ANN dinámica y compararon su rendimiento de predicción frente a la ANN tradicional y los modelos ARIMA.

Con el tiempo, la importancia del riesgo de la parametrización excesiva y el sobreajuste ha sido reconocida por varios autores; véase Hippert, Bunn y Souza (2005) [204] que usaron una gran ANN (50 entradas, 15 neuronas ocultas y 24 salidas) para predecir perfiles de carga de electricidad diaria. Sin embargo, la cuestión de si la ANN está sobre-parametrizada o no, sigue sin resolverse. Algunas ideas con valor potencial para construir ANNs minimizando el número de parámetros, usando inferencia estadística se sugieren en Teräsvirta, van Dijk y Medeiros (2005) [205].

6.5. Dinámicas estadísticas frente a deterministas

La posibilidad de que las no linealidades de alta frecuencia en datos financieros (como rendimientos por hora) sean producidos por procesos caóticos deterministas de baja dimension, ha sido objeto de algunos estudios en IJF. Cecen y Erkal (1996) [206] mostraron que no es posible explotar la dependencia determinista no lineal en los tipos de cambio diario para mejorar la predicción a corto plazo. Lisi y Medio (1997) [207] reconstruyeron el espacio de estado para los tipos de cambio mensual y usando un método lineal local, aproximaron las dinámicas del sistema en ese espacio. La predicción fuera de muestra a un paso mostró que su método mejoraba un modelo de camino aleatorio. Un estudio similar fue realizado por Cao y Soofi (1999) [208].

6.6. Otros

Otros modelos no lineales ni tan conocidos se han usado para predicción. Por ejemplo, Ludlow y Enders (2000) [209] adoptaron coeficientes de Fourier para aproximar diferentes no linealidades presentes en series temporales. Herwartz (2001) [210] amplió el vector lineal ECM para permitir asimetrías. Dahl y Hylleberg (2004) [211] compararon el modelo de regresión no lineal flexible de Hamilton (2001) [212], ANNs y dos versiones del modelo de regresión de búsqueda de proyección. En un estudio comparativo de Marcellino (2004) [213] se incluyen modelos AR variantes en tiempo. El método no paramétrico de vecinos más cercanos fue aplicado por Fernández-Rodríguez, Sosvilla-Rivero y Andrada-Félix (1999) [214].

7. Modelos de memoria larga

Cuando el parámetro de integración d de un modelo ARIMA es fraccional y mayor que cero, el proceso exhibe memoria en el sentido de que las observaciones de un periodo de tiempo largo, tiene una dependencia no despreciable. Los modelos estacionarios con memoria larga ($0 < d < 0.5$), también llamados ARMA diferenciados fraccionalmente (FARMA) o modelos ARMA integrados fraccionalmente (ARFIMA), han sido estudiados en muchos campos; véase Granger y Joyeux (1980) [215] para una introducción. Una motivación para estos estudios es que muchas series temporales empíricas tienen una función de autocorrelación

muestral que decae a una tasa menor que en un modelo ARIMA de orden finito y entero d .

El potencial de predicción de modelos ajustados a FARMA/ARFIMA, en contraposición con resultados de predicción obtenidos con otros modelos de series temporales, ha sido tema de varios artículos en IJF y un special issue (2002, 18:2). Ray, 1993a [216] y Ray, 1993b [217] realizaron un estudio comparativo entre los modelos FARMA/ARFIMA estacionales y los modelos estándar (no fraccionarios) ARIMA estacionales. Los resultados muestran que los modelos AR de mayor orden son capaces de predecir bien a largo plazo comparados con los modelos ARFIMA. Como continuación, Smith y Yadav (1994) [218] investigaron el coste de asumir una diferencia unitaria cuando una serie es solamente fraccionalmente integrada con d distinto de 1. La sobre-diferenciación de una serie producirá una pérdida en el rendimiento de predicción de un paso, con una pérdida limitada en adelante. En cambio, una serie bajo-diferenciada, es más costosa con mayores potenciales de pérdida a partir del ajuste de un modelo AR poco especificado para cualquier horizonte de predicción. La cuestión es también explorada por Andersson (2000) [219] quien mostró que la mala especificación afecta fuertemente la memoria estimada del modelo ARFIMA, usando una regla que es similar al test de Öller (1985) [220]. Man (2003) [221] argumentó que un modelo ARMA(2,2) adecuadamente adaptado, podía producir predicciones a corto plazo competitivas con los modelos ARFIMA estimados. Las predicciones multi-paso de los modelos de memoria larga fueron desarrollados por Hurvich (2002) [222] y comparados por Bhansali y Kokoszka (2002) [223].

Se han explorado muchas extensiones de modelos ARFIMA y comparaciones de su rendimiento de predicción relativo. Por ejemplo, Franses y Ooms (1997) [224] propuso el modelo ARFIMA(0, d ,0) periódico donde d puede variar con el parámetro de estacionalidad. Ravishanker y Ray (2002) [225] consideraron la estimación y predicción de modelos ARFIMA multivariados. Baillie y Chung (2002) [226] disertaron sobre el uso de modelos ARFIMA con tendencia estacionaria lineales, mientras que Beran, Feng, Ghosh y Sibbertsen (2002) [227] ampliaron este modelo para permitir tendencias no lineales. Souza y Smith (2002) investigaron el efecto de tasas de muestreo diferentes, tales como mensual versus trimestral, en estimaciones del parámetro de memoria larga d . De forma similar, Souza y Smith (2004) observaron los efectos de la agregación temporal en estimaciones y predicciones de procesos ARFIMA. Dentro del contexto de la calidad de control estadística, Ramjee, Crato y Ray (2002)[228] introdujeron un gráfico de control basado en predicción con una media móvil ponderada hiperbólicamente, diseñada específicamente para modelos ARFIMA no estacionarios.

8. Modelos ARCH/GARCH

Una característica clave de las series temporales financieras es que las rentabilidades grandes tienden a continuar rentabilidades grandes y lo mismo con rentabilidades pequeñas, es decir, hay periodos que muestran una alta (o baja) volatilidad. Este fenómeno se conoce como el agrupamiento de volatilidad

en econometría y finanzas. La clase de modelos AR condicionados a heteroscedasticidad (ARCH), introducidas por Engle (1982) [229], describen los cambios dinámicos de la varianza condicionada como una función determinista (típicamente cuadrática) de rentabilidades pasadas. Puesto que se conoce la varianza en tiempo -1 , las predicciones a un paso están disponibles. A continuación, las predicciones multipaso pueden ser computadas de forma recursiva. Un modelo más parsimonioso que ARCH es el llamado modelo ARCH generalizado (GARCH) (Bollerslev et al., 1994 [230] y Taylor, 1987 [231]) donde se permiten dependencias adicionales de los retardos de la varianza condicional. Un modelo GARCH tiene una representación tipo ARMA, de forma que los modelos comparten muchas propiedades.

La familia de modelos GARCH, y muchas de sus extensiones, son ampliamente revisadas en Bollerslev, Chou y Kroner (1992) [232], Bera y Higgins (1993) [233] y Diebold y Lopez (1995) [234]. No es sorprendente que muchos de los trabajos teóricos hayan aparecido en literatura de econometría. Por otra parte, es interesante el hecho de que ni la IJF ni la JoF hayan llegado a ser foros para publicaciones sobre el rendimiento relativo de predicción de los modelos tipo GARCH o de otros varios modelos de volatilidad en general. Como puede verse a continuación, muy pocos trabajos de IJF/JoF han tratado este tema.

Sabbatini y Linton (1998) mostraron que el modelo simple lineal GARCH(1,1) proporciona una buena parametrización para las rentabilidades diarias en el índice de mercado suizo. Sin embargo, la calidad de las predicciones fuera de muestra sugiere que este resultado hay que tomarlo con precaución. Franses y Ghijsels (1999) [235] remarcaron que esta característica puede deberse al despreciar valores atípicos aditivos (AO). Se dieron cuenta de que los modelos GARCH para las rentabilidades corregidas resultaban en unas predicciones mejoradas de la volatilidad del mercado de valores. Brooks (1998) [236] no ve un ganador claro al comparar predicciones de un paso a partir de modelos tipo GARCH estándar (simétricos) con aquellas de otros modelos lineales y ANNs. A nivel de estimación, Brooks, Burke, y Persaud (2001) [237], argumentan que los paquetes de software econométrico pueden producir resultados ampliamente variados. Claramente, esto puede tener algún impacto en la precisión de predicción de los modelos GARCH. Esta observación es muy al estilo de la de Newbold et al. (1994) [56] para modelos ARMA univariados. Fuera de la IJF, Karanasos (2001) [238] consideró los efectos en media de las predicciones multipaso de modelos ARMA con GARCH. Su método puede emplearse en la derivación de predicciones multi-paso a partir de modelos más complicados, incluyendo GARCH multivariado.

Usando dos series de tasas de cambio diarias, Galbraith y Kisinbay (2005) comparó las funciones de contenido de predicción a partir del modelo GARCH estándar y del modelo GARCH fracionariamente integrado (FIGARCH) (Baillie, Bollerslev, y Mikkelsen, 1996) [239]. Las predicciones de varianzas condicionales parecen tener un contenido de información de aproximadamente 30 días de mercado. Otra conclusión es que las predicciones por proyección autorregresiva sobre volatilidades pasadas da mejores resultados que las predicciones basadas

en GARCH, estimadas por probabilidad cuasi máxima y los modelos FIGARCH. Esto parece confirmar los resultados anteriores de Bollerslev y Wright (2001), por ejemplo. Una crítica que se oye a menudo sobre los modelos FIGARCH y sus generalizaciones es que no razones económicas por las que la predicción financiera de volatilidad tenga memoria larga. Para una crítica más fundamentada del uso de modelos de memoria larga véase Granger (2002) [240].

Empíricamente, las rentabilidades y la varianza condicional de las rentabilidades del siguiente periodo están correladas negativamente. Este fenómeno se denomina volatilidad asimétrica en la literatura (véase Engle y Ng (1993) [241]). Esto motivó a los investigadores para que desarrollaran varios modelos tipo GARCH asimétricos (incluyendo el GARCH con cambio de régimen); véase Hentschel (1995) [242] y Pagan (1996) [243] para resúmenes generales. Awartani y Corradi (2005) investigaron el impacto de la asimetría en la capacidad de predicción fuera de muestra de diferentes modelos GARCH, con varios horizontes.

Paralelamente a GARCH, muchos otros modelos se han propuesto para predicción de volatilidad. Poon y Granger (2003) [244], proporcionan una revisión cuidadosamente realizada de la investigación en esta área durante los últimos 20 años. Compararon los hallazgos de predicción de volatilidad de 93 publicaciones. Dan importantes ideas en cuestiones como evaluación de predicción, el efecto de la frecuencia de los datos en la precisión de la predicción de volatilidad, medidas de *volatilidad actual*, el efecto de confusión de valores extremos, y otros más. El estudio encontró que la volatilidad implícita proporciona mejores predicciones que los modelos de series temporales. Entre los modelos de series temporales (44 estudios) no había ganador claro entre los modelos de histórico de volatilidad (incluyendo camino aleatorio, medias históricas, ARFIMA, y varias formas de alisado exponencial) y los modelos tipo GARCH (incluyendo ARCH y sus varias ampliaciones), pero ambas clases de modelos mejoraban el rendimiento del modelo de volatilidad estadístico; véase Poon y Granger (2005) para una revisión de estos hallazgos.

El estudio de Poon y Granger contiene muchas cuestiones para continuar estudiando. Por ejemplo, los modelos asimétricos GARCH salían bien parados en los concursos de predicción. Sin embargo, no está claro hasta qué punto esto se debe a las asimetrías de la media condicional, de la varianza condicional, y/o de momentos condicionales de mayor orden. Otra cuestión para investigación futura concierne la combinación de predicciones. Los resultados en dos trabajos (Doidge y Wei, 1998 [245] y Kroner et al., 1995 [246]) encuentran de ayuda la combinación, pero en otro estudio (Vasilellis y Meade, 1996) [247] no. Sería también útil examinar el rendimiento de predicción de volatilidad de modelos tipo GARCH multivariados y no lineales, incorporando a ambos dependencias contemporáneas y temporales.

9. Predicción de datos de recuento

Los datos de recuento son frecuentes en la industria y los negocios, especialmente en datos de inventario donde son llamados *datos de demanda intermitente*.

Consecuentemente, es sorprendente que haya tan poco trabajo realizado en predicción de estos datos. Hay algo sobre métodos a medida para predicción de datos de recuento, pero pocos artículos aparecen sobre predicción de series temporales de datos de recuento que usen modelos estadísticos.

La mayoría de la investigación en predicción de recuentos está basada en Croston (1972) [248] quien propuso usar SES para predecir independientemente los valores no cero de las series y los intervalos de tiempo entre ellos. Willemain, Smart, Shockor y DeSautels (1994) [249] compararon el método de Croston con SES y encontraron que el método de Croston era más robusto, aunque estos resultados se basaban en en MAPEs que a menudo no están definidos para datos de recuento. Las condiciones bajo las cuales el método de Croston mejora al SES fueron discutidas en Johnston y Boylan (1996) [250]. Willemain, Smart y Schwarz (2004) propusieron un procedimiento de remuestreo para datos de demanda intermitente que se encontró que era más preciso que el de SES y el de Croston para las nueve series evaluadas.

La evaluación de predicciones de recuento conlleva dificultades debidas a la presencia de ceros en los datos observados. Syntetos y Boylan (2005) [251] propusieron usar el error absoluto medio relativo, mientras que Willemain et al. (2004) [252] recomendaron usar el método de transformación integral de probabilidad de Diebold, Gunther y Tay (1998) [253].

Grunwald, Hyndman, Tedesco y Tweedie (2000) revisaron muchos modelos estadísticos para series temporales de recuento, usando AR de primer orden como marco unificador para los diferentes enfoques. Un posible modelo, explorado por Brännäs (1995) [254], supone que la serie sigue una distribución de Poisson con media que depende de procesos no observados autocorrelados. Un modelo alternativo MA de valor entero fue usado por Brännäs, Hellström y Nordström (2002) para predecir niveles de ocupación de hoteles suizos.

La distribución de predicción se puede obtener por simulación usando cualquiera de estos modelos estadísticos, pero cómo resumir la distribución no es algo obvio. Freeland y McCabe (2004) propusieron usar la mediana de la distribución de predicción, y dieron un método para computar intervalos de confianza para la distribución completa en el caso de modelos autorregresivos de valores enteros (INAR) de orden 1. McCabe y Martin (2005) ampliaron estas ideas presentando metodologías bayesianas para predicción a partir de la clase de modelos INAR.

10. Evaluación de predicción y medidas de precisión

Se ha usado un desconcertante conjunto de medidas de precisión para evaluar el rendimiento de los métodos de predicción. Algunos de los cuales se listan en Mahmoud (1984) [255]. Primero definimos las medidas más comunes.

(poner tabla)

La evolución de las medidas de precisión y evaluación de predicción puede verse a través de las medidas usadas para evaluar los métodos en la mayoría de los estudios comparativos realizados. En la competición original M (Makridakis et al., 1982) [66] las medidas usadas incluían MAPE, MSE, AR, MdAPE y

PB. Sin embargo, como apuntaron Chatfield (1988) [71] y Armstrong y Collopy (1992) [256], el MSE no es apropiado para comparaciones entre series puesto que depende de la escala. MAPE también tiene problemas cuando la serie tiene valores cercanos a cero o cero, como apuntaron Makridakis, Wheelwright y Hyndman (1998, p.45) [257]. En la competición M se evitaron MAPEs excesivamente grandes (o infinitos) incluyendo sólo datos positivos. Sin embargo, es una solución artificial imposible de aplicar en todas las situaciones.

en 1992, aparecieron dos artículos de IJF y varios comentarios sobre las medidas de evaluación. Armstrong y Collopy (1992) [256] recomendaron usar errores absolutos relativos, especialmente GMRAE y MdRAE, a pesar del hecho de que los errores relativos tienen varianza infinita y media no definida. Ellos recomendaron *winsorizar* para recortar valores extremos lo que parcialmente resolvía estos problemas, pero lo cual añade complejidad al cálculo y un nivel de arbitrariedad al tener que especificar la cantidad de recorte. Fildes (1992) [258] también prefirió GMRAE aunque lo expresó en una forma equivalente como la raíz cuadrada de la media geométrica de los errores relativos cuadráticos. Esta equivalencia no parece ser advertida por ninguno de los ponentes en los comentarios de Ahlburg et al. (1992) [259].

El estudio de Fildes, Hibon, Makridakis y Meade (1998), el cual se enfocaba en predicción de datos de telecomunicaciones, usó MAPE, MdAPE, PB, AR, GMRAE y MdRAE teniendo en cuenta algunas de las críticas de los métodos usados para la competición M.

La competición M3 (Makridakis y Hibon, 2000) [260] usó tres medidas de precisión: MdRAE, sMAPE y sMdAPE. Las medidas *simétricas* fueron propuestas por Makridakis (1993) [261] en respuesta a la observación de que MAPE y MdAPE tienen la desventaja de que penalizan más errores positivos que negativos. Sin embargo, estas medidas no son tan simétricas como su nombre sugiere. Para el mismo valor de Y_t , el valor $2 * \text{Abs}(Y_t - F_t) / (Y_t + F_t)$ tiene más penalización cuando las predicciones son altas en comparación con cuando son bajas. Véase Goodwin y Lawton (1999) [262] y Koehler (2001) [33] para más disertación sobre este punto.

Es notable que ninguno de los estudios comparativos ha usado medidas relativas (a diferencia de medidas de errores relativos) tales como RelMAE o LMR. Esta última fue propuesta por Thompson (1990) [263] quien abogó por su uso basado en sus buenas propiedades estadísticas. Fue aplicada a los datos de la competición M en Thompson (1991) [264].

A parte de Thompson (1990) [263], ha habido poco trabajo teórico en las propiedades estadísticas de estas medidas. Una excepción es Wun y Pearn (1991) quienes estudiaron las propiedades estadísticas de MAE.

Una novedosa medida alternativa de precisión es la *distancia temporal*, que fue considerada por Granger y Jeon, 2003a [265] y Granger y Jeon 2003b [266]. En esta medida se capturan también las propiedades de dirección y desfase de la predicción. De nuevo, esta medida no ha sido usada en ningún estudio comparativo importante.

Una línea de investigación paralela ha examinado tests estadísticos para comparar métodos de predicción. Una contribución precoz fue Flores (1989) [267]. El mejor enfoque conocido para comprobar diferencias entre la precisión de los métodos de predicción es el test de Diebold y Mariano (1995) [234]. Harvey, Leybourne y Newbold (1997) [268] propusieron una modificación de este test con tamaño corregido. McCracken (2004) [269] examinó el efecto de estimación de parámetros en estos tests y proporcionó un nuevo método de ajuste para error de estimación de parámetros.

Otro problema en evaluación de predicción, y más serio que el error de estimación de parámetros, es el *intercambio de datos*, el uso de los mismo datos para diferentes métodos de predicción. Sullivan, Timmermann y White (2003) [270] propusieron un procedimiento de remuestreo diseñado para superar la distorsión resultante de inferencia estadística.

Una línea de investigación independiente ha examinado las propiedades teóricas de predicción de modelos de series temporales. Una contribución importante fue Clements y Hendry (1993) [271] quienes mostraron que el MSE teórico de un modelo de predicción no era invariante a transformaciones lineales con preservación de escala tales como diferenciación de los datos. En su lugar, propusieron el criterio de *momento segundo de error de predicción generalizado* (GFESM), el cual no tiene esa propiedad no deseable. Sin embargo, es difícil aplicar tales medidas empíricamente y la idea parece no haberse extendido ampliamente.

11. Combinación

Durante las últimas 3 décadas se ha estudiado la combinación, mezcla y puesta en común de predicciones obtenidas a partir de diferentes métodos de series temporales y diferentes fuentes de información. Contribuciones prematuras en este área son Bates y Granger (1969) [272], Newbold y Granger (1974) [273] y Winkler y Makridakis (1983) [274]. En una revisión bibliográfica exhaustiva, Clemen (1989) [275] resumió una evidencia irresistible de la eficiencia relativa de predicciones combinadas, normalmente en términos de varianzas de error de predicción.

Se han propuesto numerosos métodos para seleccionar los pesos de combinación. La simple media es el método de combinación más ampliamente usado (véase la revisión de Clemen y Bunn, 1985 [276]), pero el método no usa información pasada respecto a la precisión de las predicciones o la dependencia entre las predicciones. Otro simple método es la mezcla lineal de las predicciones individuales con pesos de combinación determinados por OLS (asumiendo insesgamiento) a partir de la matriz de predicciones pasadas y el vector de observaciones pasadas (Granger y Ramanathan, 1984) [277]. Sin embargo, las estimaciones OLS de los pesos son insuficientes debido a la posible presencia de correlación en serie en los errores de predicción combinados. Aksu y Gunter (1992) [278] y Gunter (1992) [279] investigaron este problema con algo más de detalle. Ellos recomendaron el uso de predicciones combinadas OLS con la restricción de que los pesos sumen uno. Granger (1989) [280] dio varias ampliaciones de la idea ori-

ginal de Bates y Granger (1969) [272] incluyendo combinación de predicciones con horizontes mayores que un período.

Mejor que usar pesos fijos, Deutsch, Granger y Teräsvirta (1994) [281] permitieron que estos cambiaran a lo largo del tiempo usando modelos STAR y de cambio de régimen. Otro esquema de ponderación variante en el tiempo fue propuesto por Fiordaliso (1998) [282], quien usó un sistema difuso para combinar un conjunto de predicciones individuales de forma no lineal. Diebold y Pauly (1990) [283] usaron técnicas de contracción bayesiana para permitir la incorporación a priori de información en la estimación de los pesos de combinación. Zou y Yang (2004) [284] consideraron la combinación de predicciones de modelos muy similares con actualización secuencial de pesos.

La combinación de pesos determinada a partir de los métodos invariantes en tiempo puede llevar a predicciones relativamente pobres si ocurre no estacionariedad entre las diferentes componentes de predicción. Miller, Clemen y Winkler (1992) [285] examinaron el efecto del desplazamiento de ubicación de la no estacionariedad en un conjunto de métodos de combinación. Concluyeron que la simple media batía otros artefactos de combinación complejos, véase también Hendry y Clements (2002) [286] para resultados más recientes. El tema relacionado de combinar predicciones a partir de modelos lineales y otros no lineales, con pesos OLS así como determinados por un método variante en el tiempo fue abordado por Terui y van Dijk (2002)[287].

La forma de la distribución del error de predicciones combinadas y el correspondiente comportamiento estadístico fue estudiado por de Menezes y Bunn (1998) [288] y Taylor y Bunn (1999) [289]. Para distribuciones de error de predicción no normales, la oblicuidad surge como un criterio relevante para especificar el método de combinación. Fang (2003) [290] dio algunas ideas de por qué las predicciones en competición pueden ser fructuosamente combinadas para producir una predicción superior a las predicciones individuales abarcando tests de predicción. Hibon y Evgeniou (2005) [291] propusieron un criterio para seleccionar entre predicciones y sus combinaciones.

Referencias

1. Brown, R. Statistical Forecasting for Inventory Control (1959) cited By (since 1996)127.
2. Brown, R. Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series (1963) cited By (since 1996)192.
3. Holt, C.: Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International Journal of Forecasting* **20**(1) (2004) 5–10 cited By (since 1996)78.
4. Winters, P.: Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management Science* **6**(3) (1960) 324–342 cited By (since 1996)264.
5. Pegels, C.: Exponential forecasting: Some new variations. *Management Science* **12**(5) (1969) 311–315 cited By (since 1996)35.
6. Muth, J.: Optimal properties of exponentially weighted forecasts. *Journal of the American Statistical Association* **55**(290) (1960) 299–306 cited By (since 1996)184.

7. Roberts, S.: A general class of holt-winters type forecasting models. *Management Science* **28**(7) (1982) 808–820 cited By (since 1996)0.
8. Abraham, B., Ledolter, J.: *Statistical Methods for Forecasting* (1983) cited By (since 1996)207.
9. Abraham, B., Ledolter, J.: Forecast functions implied by autoregressive integrated moving average models and other related forecast procedures. *International Statistical Review* **54** (1986) 51–66 cited By (since 1996)14.
10. Gardner E.S., J.: Exponential smoothing: The state of the art. *Journal of Forecasting* **4**(1) (1985) 1–28 cited By (since 1996)206.
11. Snyder, R.: Recursive estimation of dynamic linear models. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* **47**(2) (1985) 272–276 cited By (since 1996)40.
12. Bartolomei, S., Sweet, A.: A note on a comparison of exponential smoothing methods for forecasting seasonal series. *International Journal of Forecasting* **5**(1) (1989) 111–116 cited By (since 1996)8.
13. Makridakis, S., Hibon, M.: Exponential smoothing: The effect of initial values and loss functions on post-sample forecasting accuracy. *International Journal of Forecasting* **7**(3) (1991) 317–330 cited By (since 1996)8.
14. McClain, J.: Dominant tracking signals. *International Journal of Forecasting* **4**(4) (1988) 563–572 cited By (since 1996)7.
15. Sweet, A., Wilson, J.: Pitfalls in simulation-based evaluation of forecast monitoring schemes. *International Journal of Forecasting* **4**(4) (1988) 573–579 cited By (since 1996)1.
16. McKenzie, E.: General exponential smoothing and the equivalent arma process. *Journal of Forecasting* **3**(3) (1984) 333–344 cited By (since 1996)31.
17. Taylor, J.: Exponential smoothing with a damped multiplicative trend. *International Journal of Forecasting* **19**(4) (2003) 715–725 cited By (since 1996)42.
18. Gardner Jr., E.: Forecasting the failure of component parts in computer systems: A case study. *International Journal of Forecasting* **9**(2) (1993) 245–253 cited By (since 1996)5.
19. Grubb, H., Mason, A.: Long lead-time forecasting of uk air passengers by holt-winters methods with damped trend. *International Journal of Forecasting* **17**(1) (2001) 71–82 cited By (since 1996)27.
20. Miller, T., Liberatore, M.: Seasonal exponential smoothing with damped trends. an application for production planning. *International Journal of Forecasting* **9**(4) (1993) 509–515 cited By (since 1996)10.
21. Hyndman, R., Koehler, A., Snyder, R., Grose, S.: A state space framework for automatic forecasting using exponential smoothing methods. *International Journal of Forecasting* **18**(3) (2002) 439–454 cited By (since 1996)108.
22. Carreno, J., Madinaveitia, J.: A modification of time series forecasting methods for handling announced price increases. *International Journal of Forecasting* **6**(4) (1990) 479–484 cited By (since 1996)3.
23. Williams, D., Miller, D.: Level-adjusted exponential smoothing for modeling planned discontinuities. *International Journal of Forecasting* **15**(3) (1999) 273–289 cited By (since 1996)8.
24. Rosas, A., Guerrero, V.: Restricted forecasts using exponential smoothing techniques. *International Journal of Forecasting* **10**(4) (1994) 515–527 cited By (since 1996)5.
25. Lawton, R.: How should additive holt-winters estimates be corrected? *International Journal of Forecasting* **14**(3) (1998) 393–403 cited By (since 1996)10.
26. McKenzie, E.: Error analysis for winters' additive seasonal forecasting system. *International Journal of Forecasting* **2**(3) (1986) 373–382 cited By (since 1996)4.

27. Archibald, B., Koehler, A.: Normalization of seasonal factors in winter's methods. *International Journal of Forecasting* **19**(1) (2003) 143–148 cited By (since 1996)6.
28. Hyndman, R., Billah, B.: Unmasking the theta method. *International Journal of Forecasting* **19**(2) (2003) 287–290 cited By (since 1996)23.
29. Assimakopoulos, V., Nikolopoulos, K.: The theta model: A decomposition approach to forecasting. *International Journal of Forecasting* **16**(4) (2000) 521–530 cited By (since 1996)48.
30. Pfeiffermann, D., Allon, J.: Multivariate exponential smoothing: Method and practice. *International Journal of Forecasting* **5**(1) (1989) 83–98 cited By (since 1996)13.
31. Pan, X.: An alternative approach to multivariate ewma control chart. *Journal of Applied Statistics* **32**(7) (2005) 695–705 cited By (since 1996)4.
32. Ord, J., Koehler, A., Snyder, R.: Estimation and prediction for a class of dynamic nonlinear statistical models. *Journal of the American Statistical Association* **92**(440) (1997) 1621–1629 cited By (since 1996)80.
33. Koehler, A., Snyder, R., Ord, J.: Forecasting models and prediction intervals for the multiplicative holt-winters method. *International Journal of Forecasting* **17**(2) (2001) 269–286 cited By (since 1996)29.
34. Chatfield, C., Koehler, A., Ord, J., Snyder, R.: A new look at models for exponential smoothing. *Journal of the Royal Statistical Society Series D: The Statistician* **50**(2) (2001) 147–159 cited By (since 1996)36.
35. Gardner Jr., E., McKenzie, E.: Model identification in exponential smoothing. *Journal of the Operational Research Society* **39** (1988) 863–867 cited By (since 1996)17.
36. Tashman, L., Kruk, J.: The use of protocols to select exponential smoothing procedures: A reconsideration of forecasting competitions. *International Journal of Forecasting* **12**(2) (1996) 235–253 cited By (since 1996)12.
37. Collopy, F., Armstrong, J.: Rule-based forecasting: Development and validation of an expert systems approach to combining time series extrapolations. *Management Science* **38**(10) (1992) 1394–1414 cited By (since 1996)90.
38. Satchell, S., Timmermann, A.: On the optimality of adaptive expectations: Muth revisited. *International Journal of Forecasting* **11**(3) (1995) 407–416 cited By (since 1996)9.
39. Hyndman, R.: It's time to move from 'what' to 'why'. *International Journal of Forecasting* **17**(4) (2001) 567–570 cited By (since 1996)7.
40. Sweet, A.: Computing the variance of the forecast error for the holt-winters seasonal models. *Journal of Forecasting* **4** (1985) 235–243 cited By (since 1996)6.
41. Newbold, P., Bos, T.: On exponential smoothing and the assumption of deterministic trend plus white noise data-generating models. *International Journal of Forecasting* **5**(4) (1989) 523–527 cited By (since 1996)7.
42. Johnston, F., Harrison, P.: Variance of lead-time demand. *Journal of the Operational Research Society* **37**(3) (1986) 303–308 cited By (since 1996)14.
43. Yar, M., Chatfield, C.: Prediction intervals for the holt-winters forecasting procedure. *International Journal of Forecasting* **6**(1) (1990) 127–137 cited By (since 1996)31.
44. Chatfield, C., Yar, M.: Prediction intervals for multiplicative holt-winters. *International Journal of Forecasting* **7**(1) (1991) 31–37 cited By (since 1996)24.
45. Hyndman, R., Koehler, A., Ord, J., Snyder, R.: Prediction intervals for exponential smoothing using two new classes of state space models. *Journal of Forecasting* **24**(1) (2005) 17–37 cited By (since 1996)28.

46. Archibald, B.: Parameter space of the holt-winters' model. *International Journal of Forecasting* **6**(2) (1990) 199–209 cited By (since 1996)8.
47. Yule, G.: On a method of investigating periodicities in disturbed series with special reference to wolfer's sunspot numbers. *Philos. Trans. R. Soc. London* **226** (1927) 267–298 cited By (since 1996)218.
48. Kolmogorov, A.: Stationary sequences in hilbert space. *Bull. Math. Univ. Moscow* **2**(6) (1941) 1–40 cited By (since 1996)72.
49. Newbold, P.: Arima model building and the time series analysis approach to forecasting. *Journal of Forecasting* **2** (1983) 23–35 cited By (since 1996)5.
50. Box, G., Jenkins, G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (1976) cited By (since 1996)7314.
51. Bhansali, R.: Asymptotically efficient autoregressive model selection for multistep prediction. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* **48**(3) (1996) 577–602 cited By (since 1996)37.
52. Bhansali, R.: Autoregressive model selection for multistep prediction. *Journal of Statistical Planning and Inference* **78**(1-2) (1999) 295–305 cited By (since 1996)5.
53. West, K.: Asymptotic inference about predictive ability. *Econometrica* **68** (1996) 1084–1097 cited By (since 1996)1.
54. Peña, D., Sánchez, I.: Multifold predictive validation in armax time series models. *Journal of the American Statistical Association* **100**(469) (2005) 135–146 cited By (since 1996)3.
55. Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (1994) cited By (since 1996)3225.
56. Newbold, P., Agiakloglou, C., Miller, J.: Adventures with arima software. *International Journal of Forecasting* **10**(4) (1994) 573–581 cited By (since 1996)14.
57. Zellner, A.: An introduction to bayesian inference in econometrics. *An Introduction to Bayesian Inference in Econometrics* (1971) cited By (since 1996)695.
58. Kim, J.: Forecasting autoregressive time series with bias-corrected parameter estimators. *International Journal of Forecasting* **19**(3) (2003) 493–502 cited By (since 1996)15.
59. Landsman, W., Damodaran, A.: A comparison of quarterly earnings per share forecasts using james-stein and unconditional least squares parameter estimators. *International Journal of Forecasting* **5**(4) (1989) 491–500 cited By (since 1996)3.
60. Ledolter, J.: The effect of additive outliers on the forecasts from arima models. *International Journal of Forecasting* **5**(2) (1989) 231–240 cited By (since 1996)37.
61. Hotta, L., Cardoso Neto, J.: The effect of aggregation on prediction in autoregressive integrated moving-average models. *Journal of Time Series Analysis* **14** (1993) 261–269 cited By (since 1996)6.
62. Cholette, P.: Prior information and arima forecasting. *Journal of Forecasting* **1**(4) (1982) 375–383 cited By (since 1996)0.
63. Guerrero, V.: Arima forecasts with restrictions derived from a structural change. *International Journal of Forecasting* **7**(3) (1991) 339–347 cited By (since 1996)5.
64. de Alba, E.: Constrained forecasting in autoregressive time series models: A bayesian analysis. *International Journal of Forecasting* **9**(1) (1993) 95–108 cited By (since 1996)6.
65. Parzen, E.: Ararma models for time series analysis and forecasting. *Journal of Forecasting* **1** (1982) 67–82 cited By (since 1996)27.
66. Makridakis, S., Andersen, A., Carbone, R., Fildes, R., Hibon, M., Lewandowski, R., Newton, J., Parzen, E., Winkler, R.: The accuracy of extrapolation (time series) methods: Results of a forecasting competition. *Journal of Forecasting* **1**(2) (1982) 111–153 cited By (since 1996)0.

67. Meade, N., Smith, I.: Ararma vs arima-a study of the benefits of a new approach to forecasting. *Omega* **13**(6) (1985) 519–534 cited By (since 1996)6.
68. Geriner, P., Ord, J.: Automatic forecasting using explanatory variables: A comparative study. *International Journal of Forecasting* **7**(2) (1991) 127–140 cited By (since 1996)7.
69. Tashman, L., Leach, M.: Automatic forecasting software: A survey and evaluation. *International Journal of Forecasting* **7**(2) (1991) 209–230 cited By (since 1996)0.
70. Tashman, L.: Out-of-sample tests of forecasting accuracy: An analysis and review. *International Journal of Forecasting* **16**(4) (2000) 437–450 cited By (since 1996)101.
71. Chatfield, C.: What is the 'best' method of forecasting? *Journal of Applied Statistics* **15**(1) (1988) 19–38 cited By (since 1996)12.
72. Kang, I.B.: Multi-period forecasting using different models for different horizons: An application to u.s. economic time series data. *International Journal of Forecasting* **19**(3) (2003) 387–400 cited By (since 1996)17.
73. Edlund, P.E.: Identification of the multi-input box-jenkins transfer functions model. *Journal of Forecasting* **3** (1984) 297–308 cited By (since 1996)5.
74. Koreisha, S.: Causal implications: The linkage between time series and econometric modelling. *Journal of Forecasting* **2** (1983) 151–168 cited By (since 1996)1.
75. Gupta, S.: Testing causality. some caveats and a suggestion. *International Journal of Forecasting* **3**(2) (1987) 195–209 cited By (since 1996)1.
76. Del Moral, M., Valderrama, M.: A principal component approach to dynamic regression models. *International Journal of Forecasting* **13**(2) (1997) 237–244 cited By (since 1996)4.
77. Krishnamurthi, L., Narayan, J., Raj, S.: Intervention analysis using control series and exogenous variables in a transfer function model: A case study. *International Journal of Forecasting* **5**(1) (1989) 21–27 cited By (since 1996)3.
78. Quenouille, M. The analysis of multiple time-series. 2nd ed. 1968 (1957) cited By (since 1996)1.
79. Riise, T., Tjøstheim, D.: Theory and practice of multivariate arma forecasting. *Journal of Forecasting* **3** (1984) 309–317 cited By (since 1996)2.
80. De Gooijer, J., Kumar, K.: Some recent developments in non-linear time series modelling, testing, and forecasting. *International Journal of Forecasting* **8**(2) (1992) 135–156 cited By (since 1996)68.
81. Lütkepohl, H.: Comparison of predictors for temporally and contemporaneously aggregated time series. *International Journal of Forecasting* **2** (1986) 461–475 cited By (since 1996)8.
82. Bidarkota, P.: The comparative forecast performance of univariate and multivariate models: An application to real interest rate forecasting. *International Journal of Forecasting* **14**(4) (1998) 457–468 cited By (since 1996)10.
83. Funke, M.: Assessing the forecasting accuracy of monthly vector autoregressive models. the case of five oecd countries. *International Journal of Forecasting* **6**(3) (1990) 363–378 cited By (since 1996)8.
84. Dhrymes, P., Peristiani, S.: A comparison of the forecasting performance of wefa and arima time series methods. *International Journal of Forecasting* **4**(1) (1988) 81–101 cited By (since 1996)1.
85. Hafer, R., Sheehan, R.: The sensitivity of var forecasts to alternative lag structures. *International Journal of Forecasting* **5**(3) (1989) 399–408 cited By (since 1996)17.

86. Ariño, M., Franses, P.: Forecasting the levels of vector autoregressive log-transformed time series. *International Journal of Forecasting* **16**(1) (2000) 111–116 cited By (since 1996)11.
87. Wieringa, J., Horváth, C.: Computing level-impulse responses of log-specified var systems. *International Journal of Forecasting* **21**(2) (2005) 279–289 cited By (since 1996)5.
88. Hansson, J., Jansson, P., Löf, M.: Business survey data: Do they help in forecasting gdp growth? *International Journal of Forecasting* **21**(2) (2005) 377–389 cited By (since 1996)17.
89. Liu, T.R., Gerlow, M., Irwin, S.: The performance of alternative var models in forecasting exchange rates. *International Journal of Forecasting* **10**(3) (1994) 419–433 cited By (since 1996)15.
90. Simkins, S.: Forecasting with vector autoregressive (var) models subject to business cycle restrictions. *International Journal of Forecasting* **11**(4) (1995) 569–583 cited By (since 1996)6.
91. Litterman, R.: Forecasting with bayesian vector autoregressions - five years of experience. *Journal of Business and Economic Statistics* **4**(1) (1986) 25–38 cited By (since 1996)257.
92. Artis, M., Zhang, W.: Bvar forecasts for the g-7. *International Journal of Forecasting* **6**(3) (1990) 349–362 cited By (since 1996)11.
93. Ashley, R.: On the relative worth of recent macroeconomic forecasts. *International Journal of Forecasting* **4**(3) (1988) 363–376 cited By (since 1996)16.
94. Holden, K., Broomhead, A.: An examination of vector autoregressive forecasts for the u.k. economy. *International Journal of Forecasting* **6**(1) (1990) 11–23 cited By (since 1996)8.
95. Kunst, R., Neusser, K.: A forecasting comparison of some var techniques. *International Journal of Forecasting* **2**(4) (1986) 447–456 cited By (since 1996)3.
96. Ribeiro Ramos, F.: Forecasts of market shares from var and bvar models: A comparison of their accuracy. *International Journal of Forecasting* **19**(1) (2003) 95–110 cited By (since 1996)8.
97. LeSage, J., Magura, M.: Using interindustry input-output relations as a bayesian prior in employment forecasting models. *International Journal of Forecasting* **7**(2) (1991) 231–238 cited By (since 1996)15.
98. Spencer, D.: Developing a bayesian vector autoregression forecasting model. *International Journal of Forecasting* **9**(3) (1993) 407–421 cited By (since 1996)33.
99. Lesage, J.: Incorporating regional wage relations in local forecasting models with a bayesian prior. *International Journal of Forecasting* **5**(1) (1989) 37–47 cited By (since 1996)6.
100. Kling, J., Bessler, D.: A comparison of multivariate forecasting procedures for economic time series. *International Journal of Forecasting* **1**(1) (1985) 5–24 cited By (since 1996)11.
101. Engle, R., Granger, C.: Cointegration and error correction: Representation, estimation and testing. *Econometrica* **55**(2) (1987) 251–276 cited By (since 1996)7168.
102. Shoesmith, G.: Non-cointegration and causality: Implications for var modeling. *International Journal of Forecasting* **8**(2) (1992) 187–199 cited By (since 1996)7.
103. Shoesmith, G.: Multiple cointegrating vectors, error correction, and forecasting with litterman's model. *International Journal of Forecasting* **11**(4) (1995) 557–567 cited By (since 1996)13.
104. Tegene, A., Kuchler, F.: Evaluating forecasting models of farmland prices. *International Journal of Forecasting* **10**(1) (1994) 65–80 cited By (since 1996)10.

105. Wang, Z., Bessler, D.: Forecasting performance of multivariate time series models with full and reduced rank: An empirical examination. *International Journal of Forecasting* **20**(4) (2004) 683–695 cited By (since 1996)6.
106. Villani, M.: Bayesian prediction with cointegrated vector autoregressions. *International Journal of Forecasting* **17**(4) (2001) 585–605 cited By (since 1996)9.
107. Reimers, H.E.: Forecasting of seasonal cointegrated processes. *International Journal of Forecasting* **13**(3) (1997) 369–380 cited By (since 1996)5.
108. Poskitt, D.: On the specification of cointegrated autoregressive moving-average forecasting systems. *International Journal of Forecasting* **19**(3) (2003) 503–519 cited By (since 1996)6.
109. Chevillon, G., Hendry, D.: Non-parametric direct multi-step estimation for forecasting economic processes. *International Journal of Forecasting* **21**(2) (2005) 201–218 cited By (since 1996)31.
110. Findley, D., Monsell, B., Bell, W., Otto, M., Chen, B.C.: New capabilities and methods of the x-12-arima seasonal-adjustment program. *Journal of Business and Economic Statistics* **16**(2) (1998) 127–152 cited By (since 1996)128.
111. Dagum, E.: Revisions of time varying seasonal filters. *Journal of Forecasting* **1** (1982) 173–187 cited By (since 1996)1.
112. Huot, G., Chiu, K., Higginson, J., Gait, N.: Analysis of revisions in the seasonal adjustment of data using x-11-arima model-based filters. *International Journal of Forecasting* **2** (1986) 217–229 cited By (since 1996)3.
113. Pfeiffermann, D., Morry, M., Wong, P.: Estimation of the variances of x-11 arima seasonally adjusted estimators for a multiplicative decomposition and heteroscedastic variances. *International Journal of Forecasting* **11**(2) (1995) 271–283 cited By (since 1996)3.
114. Quenneville, B., Ladiray, D., Lefrançois, B.: A note on musgrave asymmetrical trend-cycle filters. *International Journal of Forecasting* **19**(4) (2003) 727–734 cited By (since 1996)8.
115. Miller, D., Williams, D.: Shrinkage estimators of time series seasonal factors and their effect on forecasting accuracy. *International Journal of Forecasting* **19**(4) (2003) 669–684 cited By (since 1996)16.
116. Miller, D., Williams, D.: Damping seasonal factors: Shrinkage estimators for the x-12-arima program. *International Journal of Forecasting* **20**(4) (2004) 529–549 cited By (since 1996)21.
117. Gómez, V., Maravall, A.: Seasonal adjustment and signal extraction in economic time series. Chapter 8 in a course in time series analysis (2001) cited By (since 1996)1.
118. Kaiser, R., Maravall, A.: Combining filter design with model-based filtering (with an application to business-cycle estimation). *International Journal of Forecasting* **21**(4) (2005) 691–710 cited By (since 1996)11.
119. Cleveland, R., Cleveland, W., McRae, J., Terpenning, I.: Stl: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics* **6**(1) (1990) 3–73 cited By (since 1996)316.
120. Simmons, L.: Time-series decomposition using the sinusoidal model. *International Journal of Forecasting* **6**(4) (1990) 485–495 cited By (since 1996)8.
121. Withycombe, R.: Forecasting with combined seasonal indices. *International Journal of Forecasting* **5**(4) (1989) 547–552 cited By (since 1996)11.
122. Bunn, D., Vassilopoulos, A.: Using group seasonal indices in multi-item short-term forecasting. *International Journal of Forecasting* **9**(4) (1993) 517–526 cited By (since 1996)11.

123. Bunn, D., Vassilopoulos, A.: Comparison of seasonal estimation methods in multi-item short-term forecasting. *International Journal of Forecasting* **15**(4) (1999) 431–443 cited By (since 1996)23.
124. Hylleberg, S., Pagan, A.: Seasonal integration and the evolving seasonals model. *International Journal of Forecasting* **13**(3) (1997) 329–340 cited By (since 1996)10.
125. Taylor, A.: On the practical problems of computing seasonal unit root tests. *International Journal of Forecasting* **13**(3) (1997) 307–318 cited By (since 1996)13.
126. Franses, P., Koehler, A.: A model selection strategy for time series with increasing seasonal variation. *International Journal of Forecasting* **14**(3) (1998) 405–414 cited By (since 1996)11.
127. Paap, R., Franses, P., Hoek, H.: Mean shifts, unit roots and forecasting seasonal time series. *International Journal of Forecasting* **13**(3) (1997) 357–368 cited By (since 1996)11.
128. Clements, M., Hendry, D.: An empirical study of seasonal unit roots in forecasting. *International Journal of Forecasting* **13**(3) (1997) 341–355 cited By (since 1996)24.
129. Osborn, D.: A survey of seasonality in uk macroeconomic variables. *International Journal of Forecasting* **6**(3) (1990) 327–336 cited By (since 1996)47.
130. Hans Franses, P., Romijn, G.: Periodic integration in quarterly uk macroeconomic variables. *International Journal of Forecasting* **9**(4) (1993) 467–476 cited By (since 1996)10.
131. Wells, J.: Modelling seasonal patterns and long-run trends in u.s. time series. *International Journal of Forecasting* **13**(3) (1997) 407–420 cited By (since 1996)6.
132. Herwartz, H.: Performance of periodic error correction models in forecasting consumption data. *International Journal of Forecasting* **13**(3) (1997) 421–431 cited By (since 1996)7.
133. Novales, A., De Fruto, R.: Forecasting with periodic models: A comparison with time invariant coefficient models. *International Journal of Forecasting* **13**(3) (1997) 393–405 cited By (since 1996)12.
134. Ula, T.: Forecasting of multivariate periodic autoregressive moving-average processes. *J. Time Ser. Anal.* **14**(6) (1993) 645–657 cited By (since 1996)14.
135. Chen, C.: Robustness properties of some forecasting methods for seasonal time series: A monte carlo study. *International Journal of Forecasting* **13**(2) (1997) 269–280 cited By (since 1996)7.
136. Noakes, D., McLeod, A., Hipel, K.: Forecasting monthly riverflow time series. *International Journal of Forecasting* **1**(2) (1985) 179–190 cited By (since 1996)32.
137. Albertson, K., Aylen, J.: Modelling the great lakes freeze: Forecasting and seasonality in the market for ferrous scrap. *International Journal of Forecasting* **12**(3) (1996) 345–359 cited By (since 1996)13.
138. Kulendran, N., King, M.: Forecasting international quarterly tourist flows using error-correction and time-series models. *International Journal of Forecasting* **13**(3) (1997) 319–327 cited By (since 1996)97.
139. Franses, P., van Dijk, D.: The forecasting performance of various models for seasonality and nonlinearity for quarterly industrial production. *International Journal of Forecasting* **21**(1) (2005) 87–102 cited By (since 1996)16.
140. Kalman, R.: A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering* (1960) 35–45 cited By (since 1996)7883.
141. Schweppe, F.: Evaluation of likelihood functions for gaussian signals. *IEEE Transactions on Information Theory* **11**(1) (1965) 61–70 cited By (since 1996)144.
142. Shumway, R., Stoffer, D.: An approach to time series smoothing and forecasting using the em algorithm. *J. Time Series Anal.* **3**(4) (1982) 253–264 cited By (since 1996)428.

143. Harrison, P., Stevens, C.: Bayesian forecasting. *Journal of the Royal Statistical Society, Ser B* **38** (1976) 205–247 cited By (since 1996)215.
144. Fildes, R.: An evaluation of bayesian forecasting. *Journal of Forecasting* **2**(2) (1983) 137–150 cited By (since 1996)0.
145. West, M., Harrison, P., Migon, H.: Dynamic generalized linear models and bayesian forecasting. *Journal of the American Statistical Association* **80**(389) (1985) 73–97 cited By (since 1996)150.
146. West, M., Harrison, J. *Bayesian Forecasting and Dynamic Models* (1997) cited By (since 1996)1041.
147. Harvey, A.: A unified view of statistical forecasting procedures. *Journal of Forecasting* **3**(3) (1984) 245–275 cited By (since 1996)0.
148. Harvey, A. *Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter* (1989) cited By (since 1996)2173.
149. Harvey, A.: Chapter 7 forecasting with unobserved components time series models. *Handbook of Economic Forecasting* **1** (2006) 327–412 cited By (since 1996)23.
150. Ray, W.: Rates of convergence to steady state for the linear growth version of a dynamic linear model (dlm). *International Journal of Forecasting* **5**(4) (1989) 537–545 cited By (since 1996)2.
151. Harvey, A., Snyder, R.: Structural time series models in inventory control. *International Journal of Forecasting* **6**(2) (1990) 187–198 cited By (since 1996)8.
152. Proietti, T.: Comparing seasonal components for structural time series models. *International Journal of Forecasting* **16**(2) (2000) 247–260 cited By (since 1996)18.
153. Smith, J.: A generalization of the bayesian steady forecasting model. *J. R. Statist. Soc. B* **41**(3) (1979) 375–387 cited By (since 1996)32.
154. Grunwald, G., Raftery, A., Guttorp, P.: Time series of continuous proportions. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* **55**(1) (1993) 103–116 cited By (since 1996)29.
155. Harvey, A., Fernandes, C.: Time series models for count or qualitative observations. *Journal of Business and Economic Statistics* **7**(4) (1989) 407–417 cited By (since 1996)80.
156. Grunwald, G., Hamza, K., Hyndman, R.: Some properties and generalizations of non-negative bayesian time series models. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Statistical Methodology* **59**(3) (1997) 615–626 cited By (since 1996)15.
157. Mittnik, S.: Macroeconomic forecasting experience with balanced state space models. *International Journal of Forecasting* **6**(3) (1990) 337–348 cited By (since 1996)5.
158. Vinod, H., Basu, P.: Forecasting consumption, income and real interest rates from alternative state space models. *International Journal of Forecasting* **11**(2) (1995) 217–231 cited By (since 1996)1.
159. Coomes, P.: A kalman filter formulation for noisy regional job data. *International Journal of Forecasting* **7**(4) (1992) 473–481 cited By (since 1996)6.
160. Patterson, K.: Forecasting the final vintage of real personal disposable income: A state space approach. *International Journal of Forecasting* **11**(3) (1995) 395–405 cited By (since 1996)6.
161. Durbin, J., Koopman, S. *Time Series Analysis by State Space Methods* (2001) cited By (since 1996)688.
162. Volterra, V. *Theory of Functionals and of Integral and Integro-Differential Equations* (1959) cited By (since 1996)510.
163. Wiener, N. *Nonlinear Problems in Random Theory* (1958) cited By (since 1996)461.

164. Poskitt, D., Tremayne, A.: The selection and use of linear and bilinear time series models. *International Journal of Forecasting* **2**(1) (1986) 101–114 cited By (since 1996)4.
165. Pemberton, J.: Exact least squares multi-step prediction from nonlinear autoregressive models. *J. Time Ser. Anal.* **8** (1987) 443–448 cited By (since 1996)15.
166. Al-Qassam, M., Lane, J.: Forecasting exponential autoregressive models of order 1. *Journal of Time Series Analysis* **10** (1989) 95–113 cited By (since 1996)12.
167. Granger, C., Teräsvirta, T. *Modelling Nonlinear Economic Relationships* (1993) cited By (since 1996)784.
168. Clements, M., Franses, P., Swanson, N.: Forecasting economic and financial time-series with non-linear models. *International Journal of Forecasting* **20**(2) (2004) 169–183 cited By (since 1996)69.
169. Tong, H.: Threshold models in non-linear time series analysis. *Threshold Models in Nonlinear Time Series Analysis* (1983) cited By (since 1996)425.
170. Tong, H. *Non-linear Time Series: A Dynamical System Approach* (1990) cited By (since 1996)1541.
171. Clements, M., Smith, J.: The performance of alternative forecasting methods for setar models. *International Journal of Forecasting* **13**(4) (1997) 463–475 cited By (since 1996)47.
172. De Gooijer, J., Vidiella-i Anguera, A.: Forecasting threshold cointegrated systems. *International Journal of Forecasting* **20**(2) (2004) 237–253 cited By (since 1996)13.
173. Brockwell, P., Hyndman, R.: On continuous-time threshold autoregression. *International Journal of Forecasting* **8**(2) (1992) 157–173 cited By (since 1996)11.
174. Astatkie, T., Watts, D., Watt, W.: Nested threshold autoregressive (netar) models. *International Journal of Forecasting* **13**(1) (1997) 105–116 cited By (since 1996)17.
175. Boero, G., Marrocu, E.: The performance of setar models: A regime conditional evaluation of point, interval and density forecasts. *International Journal of Forecasting* **20**(2) (2004) 305–320 cited By (since 1996)10.
176. Enders, W., Falk, B.: Threshold-autoregressive, median-unbiased, and cointegration tests of purchasing power parity. *International Journal of Forecasting* **14**(2) (1998) 171–186 cited By (since 1996)26.
177. Sarantis, N.: Nonlinearities, cyclical behaviour and predictability in stock markets: International evidence. *International Journal of Forecasting* **17**(3) (2001) 459–482 cited By (since 1996)61.
178. Bradley, M., Jansen, D.: Forecasting with a nonlinear dynamic model of stock returns and industrial production. *International Journal of Forecasting* **20**(2) (2004) 321–342 cited By (since 1996)31.
179. Fok, D., van Dijk, D., Franses, P.: Forecasting aggregates using panels of nonlinear time series. *International Journal of Forecasting* **21**(4) (2005) 785–794 cited By (since 1996)9.
180. Franses, P., Paap, R., Vroomen, B.: Forecasting unemployment using an autoregression with censored latent effects parameters. *International Journal of Forecasting* **20**(2) (2004) 255–271 cited By (since 1996)6.
181. Hastie, T., Tibshirani, R. *Generalized Additive Models* (1990) cited By (since 1996)5324.
182. Chen, R., Tsay, R.: Functional-coefficient autoregressive models. *J. Amer. Statist. Assoc.* **88**(421) (1993) 298–308 cited By (since 1996)211.
183. Cai, Z., Fan, J., Yao, Q.: Functional-coefficient regression models for nonlinear time series. *Journal of the American Statistical Association* **95**(451) (2000) 941–955 cited By (since 1996)200.

184. Harvill, J., Ray, B.: A note on multi-step forecasting with functional coefficient autoregressive models. *International Journal of Forecasting* **21**(4) (2005) 717–727 cited By (since 1996)13.
185. Darbellay, G., Slama, M.: Forecasting the short-term demand for electricity: Do neural networks stand a better chance? *International Journal of Forecasting* **16**(1) (2000) 71–83 cited By (since 1996)129.
186. Zhang, G., Eddy Patuwo, B., Y. Hu, M.: Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. *International Journal of Forecasting* **14**(1) (1998) 35–62 cited By (since 1996)946.
187. Hippert, H., Pedreira, C., Souza, R.: Neural networks for short-term load forecasting: A review and evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems* **16**(1) (2001) 44–55 cited By (since 1996)647.
188. Chatfield, C.: Neural networks: Forecasting breakthrough or passing fad? *International Journal of Forecasting* **9**(1) (1993) 1–3 cited By (since 1996)46.
189. Chatfield, C.: Positive or negative? *International Journal of Forecasting* **11**(4) (1995) 501–502 cited By (since 1996)13.
190. Callen, J., Kwan, C., Yip, P., Yuan, Y.: Neural network forecasting of quarterly accounting earnings. *International Journal of Forecasting* **12**(4) (1996) 475–482 cited By (since 1996)39.
191. Church, K., Curram, S.: Forecasting consumers' expenditure: A comparison between econometric and neural network models. *International Journal of Forecasting* **12**(2) (1996) 255–267 cited By (since 1996)27.
192. Conejo, A., Contreras, J., Espínola, R., Plazas, M.: Forecasting electricity prices for a day-ahead pool-based electric energy market. *International Journal of Forecasting* **21**(3) (2005) 435–462 cited By (since 1996)145.
193. Gorr, W., Nagin, D., Szczypula, J.: Comparative study of artificial neural network and statistical models for predicting student grade point averages. *International Journal of Forecasting* **10**(1) (1994) 17–34 cited By (since 1996)60.
194. Tkacz, G.: Neural network forecasting of canadian gdp growth. *International Journal of Forecasting* **17**(1) (2001) 57–69 cited By (since 1996)66.
195. Adya, M., Collopy, F.: How effective are neural networks at forecasting and prediction? a review and evaluation. *Journal of Forecasting* **17**(5-6) (1998) 481–495 cited By (since 1996)149.
196. Gorr, W.: Editorial: Research prospective on neural network forecasting. *International Journal of Forecasting* **10**(1) (1994) 1–4 cited By (since 1996)41.
197. Hill, T., Marquez, L., O'Connor, M., Remus, W.: Artificial neural network models for forecasting and decision making. *International Journal of Forecasting* **10**(1) (1994) 5–15 cited By (since 1996)105.
198. Balkin, S., Ord, J.: Automatic neural network modeling for univariate time series. *International Journal of Forecasting* **16**(4) (2000) 509–515 cited By (since 1996)57.
199. Qi, M.: Predicting us recessions with leading indicators via neural network models. *International Journal of Forecasting* **17**(3) (2001) 383–401 cited By (since 1996)36.
200. Olson, D., Mossman, C.: Neural network forecasts of canadian stock returns using accounting ratios. *International Journal of Forecasting* **19**(3) (2003) 453–465 cited By (since 1996)31.
201. Swanson, N., White, H.: Forecasting economic time series using flexible versus fixed specification and linear versus nonlinear econometric models. *International Journal of Forecasting* **13**(4) (1997) 439–461 cited By (since 1996)93.
202. Heravi, S., Osborn, D., Birchenhall, C.: Linear versus neural network forecasts for european industrial production series. *International Journal of Forecasting* **20**(3) (2004) 435–446 cited By (since 1996)42.

203. Ghiassi, M., Saidane, H., Zimbra, D.: A dynamic artificial neural network model for forecasting time series events. *International Journal of Forecasting* **21**(2) (2005) 341–362 cited By (since 1996)75.
204. Hippert, H., Bunn, D., Souza, R.: Large neural networks for electricity load forecasting: Are they overfitted? *International Journal of Forecasting* **21**(3) (2005) 425–434 cited By (since 1996)34.
205. Teräsvirta, T., van Dijk, D., Medeiros, M.: Linear models, smooth transition autoregressions, and neural networks for forecasting macroeconomic time series: A re-examination. *International Journal of Forecasting* **21**(4) (2005) 755–774 cited By (since 1996)62.
206. Cecen, A., Erkal, C.: Distinguishing between stochastic and deterministic behavior in high frequency foreign exchange rate returns: Can non-linear dynamics help forecasting? *International Journal of Forecasting* **12**(4) (1996) 465–473 cited By (since 1996)23.
207. Lisi, F., Medio, A.: Is a random walk the best exchange rate predictor? *International Journal of Forecasting* **13**(2) (1997) 255–267 cited By (since 1996)20.
208. Cao, L., Soofi, A.: Nonlinear deterministic forecasting of daily dollar exchange rates. *International Journal of Forecasting* **15**(4) (1999) 421–430 cited By (since 1996)26.
209. Ludlow, J., Enders, W.: Estimating non-linear arma models using fourier coefficients. *International Journal of Forecasting* **16**(3) (2000) 333–347 cited By (since 1996)21.
210. Herwartz, H.: Investigating the jpy/dem-rate: Arbitrage opportunities and a case for asymmetry. *International Journal of Forecasting* **17**(2) (2001) 231–245 cited By (since 1996)4.
211. Dahl, C., Hylleberg, S.: Flexible regression models and relative forecast performance. *International Journal of Forecasting* **20**(2) (2004) 201–217 cited By (since 1996)7.
212. Hamilton, J.: A parametric approach to flexible nonlinear inference. *Econometrica* **69**(3) (2001) 537–573 cited By (since 1996)70.
213. Marcellino, M.: Forecasting emu macroeconomic variables. *International Journal of Forecasting* **20**(2) (2004) 359–372 cited By (since 1996)17.
214. Fernández-Rodríguez, F., Sosvilla-Rivero, S., Andrada-Félix, J.: Exchange-rate forecasts with simultaneous nearest-neighbour methods: Evidence from the ems. *International Journal of Forecasting* **15**(4) (1999) 383–392 cited By (since 1996)33.
215. Granger, C., Joyeux, R.: An introduction to long-memory time series models and fractional differencing. *Journal of Time Series Analysis* **1**(1) (1980) 15–29 cited By (since 1996)1061.
216. Ray, B.: Long-range forecasting of ibm product revenues using a seasonal fractionally differenced arma model. *International Journal of Forecasting* **9**(2) (1993) 255–269 cited By (since 1996)49.
217. Ray, B.: Modeling long-memory processes for optimal long-range prediction. *Journal of Time Series Analysis* **14**(5) (1993) 511–525 cited By (since 1996)34.
218. Smith, J., Yadav, S.: Forecasting costs incurred from unit differencing fractionally integrated processes. *International Journal of Forecasting* **10**(4) (1994) 507–514 cited By (since 1996)11.
219. Andersson, M.: Do long-memory models have long memory? *International Journal of Forecasting* **16**(1) (2000) 121–124 cited By (since 1996)8.
220. Öller, L.E.: How far can changes in general business activity be forecasted? *International Journal of Forecasting* **1**(2) (1985) 135–141 cited By (since 1996)10.

221. Man, K.: Long memory time series and short term forecasts. *International Journal of Forecasting* **19**(3) (2003) 477–491 cited By (since 1996)24.
222. Hurvich, C.: Multistep forecasting of long memory series using fractional exponential models. *International Journal of Forecasting* **18**(2) (2002) 167–179 cited By (since 1996)13.
223. Bhansali, R., Kokoszka, P.: Computation of the forecast coefficients for multistep prediction of long-range dependent time series. *International Journal of Forecasting* **18**(2) (2002) 181–206 cited By (since 1996)9.
224. Franses, P., Ooms, M.: A periodic long-memory model for quarterly uk inflation. *International Journal of Forecasting* **13**(1) (1997) 117–126 cited By (since 1996)21.
225. Ravishanker, N., Ray, B.: Bayesian prediction for vector arfima processes. *International Journal of Forecasting* **18**(2) (2002) 207–214 cited By (since 1996)8.
226. Baillie, R., Chung, S.K.: Modeling and forecasting from trend-stationary long memory models with applications to climatology. *International Journal of Forecasting* **18**(2) (2002) 215–226 cited By (since 1996)19.
227. Beran, J., Feng, Y., Ghosh, S., Sibbertsen, P.: On robust local polynomial estimation with long-memory errors. *International Journal of Forecasting* **18**(2) (2002) 227–241 cited By (since 1996)7.
228. Ramjee, R., Crato, N., Ray, B.: A note on moving average forecasts of long memory processes with an application to quality control. *International Journal of Forecasting* **18**(2) (2002) 291–297 cited By (since 1996)4.
229. Engle, R.: Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of united kingdom inflation. *Econometrica* **50** (1982) 987–1008 cited By (since 1996)4825.
230. Bollerslev, T., Engle, R., Nelson, D.: Arch models. *Handbook of Econometrics* **4** (1994) 2959–3038 cited By (since 1996)445.
231. Taylor, S.: Forecasting the volatility of currency exchange rates. *International Journal of Forecasting* **3**(1) (1987) 159–170 cited By (since 1996)26.
232. Bollerslev, T., Chou, R., Kroner, K.: Arch modeling in finance. a review of the theory and empirical evidence. *Journal of Econometrics* **52**(1-2) (1992) 5–59 cited By (since 1996)1516.
233. Bera, A., Higgins, M.: Arch models: Properties, estimation and testing. *Journal of Economic Surveys* **7**(4) (1993) 305–366 cited By (since 1996)288.
234. Diebold, F., Mariano, R.: Comparing predictive accuracy. *Journal of Business and Economic Statistics* **13**(3) (1995) 253–263 cited By (since 1996)1437.
235. Franses, P., Ghijsels, H.: Additive outliers, garch and forecasting volatility. *International Journal of Forecasting* **15**(1) (1999) 1–9 cited By (since 1996)64.
236. Brooks, C.: Predicting stock index volatility: Can market volume help? *Journal of Forecasting* **17**(1) (1998) 59–80 cited By (since 1996)65.
237. Brooks, C., Burke, S., Persaud, G.: Benchmarks and the accuracy of garch model estimation. *International Journal of Forecasting* **17**(1) (2001) 45–56 cited By (since 1996)42.
238. Karanasos, M.: Prediction in arma models with garch in mean effects. *Journal of Time Series Analysis* **22**(5) (2001) 555–576 cited By (since 1996)8.
239. Baillie, R., Bollerslev, T., Mikkelsen, H.: Fractionally integrated generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of Econometrics* **74**(1) (1996) 3–30 cited By (since 1996)588.
240. Granger, C.: Long memory, volatility, risk and distribution. Manuscript (2002) cited By (since 1996)1.
241. Engle, R., Ng, V.: Measuring and testing the impact of news on volatility. *Journal of Finance* **48**(5) (1993) 1749–1778 cited By (since 1996)1075.

242. Hentschel, L.: All in the family nesting symmetric and asymmetric garch models. *Journal of Financial Economics* **39**(1) (1995) 71–104 cited By (since 1996)201.
243. Pagan, A.: The econometrics of financial markets. *Journal of Empirical Finance* **48**(1-3) (1996) 15–102 cited By (since 1996)242.
244. Poon, S.H., Granger, C.: Forecasting volatility in financial markets: A review. *Journal of Economic Literature* **41**(2) (2003) 478–539 cited By (since 1996)357.
245. Doidge, C., Wei, J.: Volatility forecasting and the efficiency of the toronto 35 index options market. *Canadian Journal of Administrative Sciences* **15**(1) (1998) 28–38 cited By (since 1996)8.
246. Kroner, K., Kneafsey, K., Claessens, S.: Forecasting volatility in commodity markets. *Journal of Forecasting* **14** (1995) 77–95 cited By (since 1996)20.
247. Vasilellis, G., Meade, N.: Forecasting volatility for portfolio selection. *Journal of Business Finance and Accounting* **23**(1) (1996) 125–143 cited By (since 1996)17.
248. Croston, J.: Forecasting and stock control for intermittent demands. *Operational Research Quarterly* **23**(3) (1972) 289–303 cited By (since 1996)159.
249. Willemain, T., Smart, C., Shockor, J., DeSautels, P.: Forecasting intermittent demand in manufacturing: a comparative evaluation of croston's method. *International Journal of Forecasting* **10**(4) (1994) 529–538 cited By (since 1996)82.
250. Johnston, F., Boylan, J.: Forecasting intermittent demand: A comparative evaluation of croston's method. comment. *International Journal of Forecasting* **12**(2) (1996) 297–298 cited By (since 1996)12.
251. Syntetos, A., Boylan, J.: The accuracy of intermittent demand estimates. *International Journal of Forecasting* **21**(2) (2005) 303–314 cited By (since 1996)79.
252. Willemain, T., Smart, C., Schwarz, H.: A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories. *International Journal of Forecasting* **20**(3) (2004) 375–387 cited By (since 1996)89.
253. Diebold, F., Gunther, T., Tay, A.: Evaluating density forecasts with applications to financial risk management. *International Economic Review* **39**(4) (1998) 863–883 cited By (since 1996)373.
254. Brannas, K., Hellstrom, J., Nordstrom, J.: A new approach to modelling and forecasting monthly guest nights in hotels. *International Journal of Forecasting* **18**(1) (2002) 19–30 cited By (since 1996)28.
255. Mahmoud, E.: Accuracy in forecasting: A survey. *Journal of Forecasting* **3**(2) (1984) 139–159 cited By (since 1996)0.
256. Armstrong, J., Collopy, F.: Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons. *International Journal of Forecasting* **8**(1) (1992) 69–80 cited By (since 1996)267.
257. Makridakis, S., Wheelwright, S., McGee, V. *Forecasting: Methods and Applications* (1983) cited By (since 1996)1119.
258. Fildes, R.: The evaluation of extrapolative forecasting methods. *International Journal of Forecasting* **8**(1) (1992) 81–98 cited By (since 1996)102.
259. Chatfield, C.: A commentary on error measures. *International Journal of Forecasting* **8**(1) (1992) 100–102 cited By (since 1996)11.
260. Makridakis, S., Hibon, M.: The m3-competition: Results, conclusions and implications. *International Journal of Forecasting* **16**(4) (2000) 451–476 cited By (since 1996)324.
261. Makridakis, S.: Accuracy measures: theoretical and practical concerns. *International Journal of Forecasting* **9**(4) (1993) 527–529 cited By (since 1996)97.
262. Goodwin, P., Lawton, R.: On the asymmetry of the symmetric mape. *International Journal of Forecasting* **15**(4) (1999) 405–408 cited By (since 1996)42.

263. Thompson, P.: An mse statistic for comparing forecast accuracy across series. *International Journal of Forecasting* **6**(2) (1990) 219–227 cited By (since 1996)11.
264. Thompson, P.: Evaluation of the m-competition forecasts via log mean squared error ratio. *International Journal of Forecasting* **7**(3) (1991) 331–334 cited By (since 1996)2.
265. Granger, C., Jeon, Y.: A time-distance criterion for evaluating forecasting models. *International Journal of Forecasting* **19**(2) (2003) 199–215 cited By (since 1996)8.
266. Granger, C., Jeon, Y.: Comparing forecasts of inflation using time distance. *International Journal of Forecasting* **19**(3) (2003) 339–349 cited By (since 1996)10.
267. Flores, B.: The utilization of the wilcoxon test to compare forecasting methods: A note. *International Journal of Forecasting* **5**(4) (1989) 529–535 cited By (since 1996)5.
268. Harvey, D., Leybourne, S., Newbold, P.: Testing the equality of prediction mean squared errors. *International Journal of Forecasting* **13**(2) (1997) 281–291 cited By (since 1996)315.
269. McCracken, M.: Parameter estimation and tests of equal forecast accuracy between non-nested models. *International Journal of Forecasting* **20**(3) (2004) 503–514 cited By (since 1996)8.
270. Sullivan, R., Timmermann, A., White, H.: Forecast evaluation with shared data sets. *International Journal of Forecasting* **19**(2) (2003) 217–227 cited By (since 1996)17.
271. Clements, M., Hendry, D.: On the limitations of comparing mean square forecast errors. *Journal of Forecasting* **12**(8) (1993) 617–637 cited By (since 1996)0.
272. JM, B., CWJ, G.: Combination of forecasts. *Operational Research Quarterly* **20**(4) (1969) 451–468 cited By (since 1996)700.
273. Newbold, P., Granger, C.: Experience with forecasting univariate time series and the combination of forecasts. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A* **137**(2) (1974) 131–165 cited By (since 1996)157.
274. Winkler, R., Makridakis, S.: The combination of forecasts. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A* **146**(2) (1983) 150–157 cited By (since 1996)66.
275. Clemen, R.: Combining forecasts: A review and annotated bibliography. *International Journal of Forecasting* **5**(4) (1989) 559–583 cited By (since 1996)605.
276. Bunn, D.: Statistical efficiency in the linear combination of forecasts. *International Journal of Forecasting* **1**(2) (1985) 151–163 cited By (since 1996)26.
277. Granger, C., Ramanathan, R.: Improved methods of combining forecasts. *Journal of Forecasting* **3**(2) (1984) 197–204 cited By (since 1996)0.
278. Aksu, C., Gunter, S.: An empirical analysis of the accuracy of sa, ols, erls and nrls combination forecasts. *International Journal of Forecasting* **8**(1) (1992) 27–43 cited By (since 1996)20.
279. Gunter, S.: Nonnegativity restricted least squares combinations. *International Journal of Forecasting* **8**(1) (1992) 45–59 cited By (since 1996)9.
280. Granger, C.: Combining forecasts-twenty years later. *Journal of Forecasting* **8**(3) (1989) 167–173 cited By (since 1996)0.
281. Deutsch, M., Granger, C., Teräsvirta, T.: The combination of forecasts using changing weights. *International Journal of Forecasting* **10**(1) (1994) 47–57 cited By (since 1996)52.
282. Fiordaliso, A.: A nonlinear forecasts combination method based on takagi-sugeno fuzzy systems. *International Journal of Forecasting* **14**(3) (1998) 367–379 cited By (since 1996)31.
283. Diebold, F., Pauly, P.: The use of prior information in forecast combination. *International Journal of Forecasting* **6**(4) (1990) 503–508 cited By (since 1996)37.

- 284. Zou, H., Yang, Y.: Combining time series models for forecasting. *International Journal of Forecasting* **20**(1) (2004) 69–84 cited By (since 1996)56.
- 285. Miller, C., Clemen, R., Winkler, R.: The effect of nonstationarity on combined forecasts. *International Journal of Forecasting* **7**(4) (1992) 515–529 cited By (since 1996)7.
- 286. Hendry, D., Clements, M.: Pooling of forecasts. *Econometrics Journal* **5** (2002) 1–26 cited By (since 1996)31.
- 287. Terui, N., Van Dijk, H.: Combined forecasts from linear and nonlinear time series models. *International Journal of Forecasting* **18**(3) (2002) 421–438 cited By (since 1996)66.
- 288. De Menezes, L., Bunn, D.: The persistence of specification problems in the distribution of combined forecast errors. *International Journal of Forecasting* **14**(3) (1998) 415–426 cited By (since 1996)4.
- 289. Taylor, J., Bunn, D.: Investigating improvements in the accuracy of prediction intervals for combinations of forecasts: A simulation study. *International Journal of Forecasting* **15**(3) (1999) 325–339 cited By (since 1996)13.
- 290. Fang, Y.: Forecasting combination and encompassing tests. *International Journal of Forecasting* **19**(1) (2003) 87–94 cited By (since 1996)32.
- 291. Hibon, M., Evgeniou, T.: To combine or not to combine: Selecting among forecasts and their combinations. *International Journal of Forecasting* **21**(1) (2005) 15–24 cited By (since 1996)87.