

Tratamiento químico de relaves auríferos para la degradación del cianuro de sodio

Chemical treatment of gold tailings for the degradation of sodium cyanide

Abarca Rodríguez Joaquín José¹, Carreño Cisneros Edgardo Octavio¹, Paredes Aguirre Freddy¹, Nunja García José Vicente¹, Ruíz Sánchez Berardo Beder¹, Zapata Del Solar Helen Analí¹, Héctor Castro Bartolomé¹, Espinoza Torres Elba Inés¹

RESUMEN

Objetivo: Este estudio tuvo como objetivo evaluar el tratamiento químico de relaves auríferos para la degradación del cianuro de sodio mediante el uso de hipoclorito de sodio, peróxido de hidrógeno y el control de pH. **Métodos:** Se realizó una investigación experimental utilizando relaves auríferos de la minera Vicus SAC. Se llevaron a cabo 11 pruebas, bajo un diseño factorial 2^3 con 8 pruebas experimentales y 3 pruebas centrales. Las variables evaluadas fueron el pH, el hipoclorito de sodio (NaClO) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), con un nivel de confianza del 95% y un error del 5%. Las pruebas se realizaron con 250 mL de muestra por agitación durante 25 minutos. Posteriormente, se analizó la degradación de cianuro con el fotómetro YSI 9300. **Resultados:** El hipoclorito de sodio y el pH demostraron ser los factores más influyentes en la degradación del cianuro de sodio, alcanzando una degradación máxima del 97,65% en condiciones de 0,17 g/L de NaClO, 0,05 g/L de H_2O_2 y pH de 10. Las interacciones entre NaClO/pH y H_2O_2 /pH fueron significativas, mientras que el H_2O_2 de forma aislada no tuvo un efecto significativo. Sin embargo, el agua tratada no cumplió con los estándares internacionales, ya que registró 0.73 ppm de cianuro residual, superando los límites establecidos por la OMS, la UE y las normativas ambientales locales. **Conclusiones:** El hipoclorito de sodio y el pH son determinantes clave en la degradación eficiente del cianuro de sodio en relaves auríferos. Sin embargo, es necesario ajustar los parámetros del tratamiento para cumplir con los estándares internacionales de calidad del agua.

Palabras clave: Tratamiento químico, relaves auríferos, cianuro de sodio, degradación de cianuro.

ABSTRACT

Objective: This study aimed to evaluate the chemical treatment of gold tailings for the degradation of sodium cyanide using sodium hypochlorite, hydrogen peroxide, and pH control. **Methods:** An experimental investigation was conducted using gold tailings from the Vicus SAC mining operations. Eleven tests were carried out under a 2^3 factorial design with 8 experimental tests and 3 central tests. The variables evaluated were pH, sodium hypochlorite (NaClO), and hydrogen peroxide (H_2O_2), with a 95% confidence level and a 5% error margin. The tests were performed with 250 mL samples agitated for 25 minutes. Cyanide degradation was then analyzed using a YSI 9300 photometer. **Results:** Sodium hypochlorite and pH proved to be the most influential factors in the degradation of sodium cyanide, achieving a maximum degradation of 97,65% under conditions of 0,17 g/L of NaClO, 0,05 g/L of H_2O_2 , and a pH of 10. The interactions between NaClO/pH and H_2O_2 /pH were significant, while H_2O_2 alone did not have a significant effect. However, the treated water did not meet international standards, as it registered 0,73 ppm of residual cyanide, exceeding the limits set by the WHO, the EU, and local environmental regulations. **Conclusions:** Sodium hypochlorite and pH are key factors in the efficient degradation of sodium cyanide in gold tailings. However, adjustments to treatment parameters are necessary to comply with international water quality standards.

Keywords: Chemical treatment, gold tailings, sodium cyanide, cyanide degradation

Recibido 12/05/2023 Aprobado 28/05/2023

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



¹Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión jabarca@unifsc.edu.pe; ecarreno@unifsc.edu.pe; fparedes@unifsc.edu.pe; jnunja@unifsc.edu.pe; bruiz@unifsc.edu.pe; hzapata@unifsc.edu.pe; hcastro@unifsc.edu.pe; 1636202011@unifsc.edu.pe.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento adecuado de los relaves auríferos es esencial para reducir el impacto ambiental que generan, especialmente en lo que respecta a la contaminación de cuerpos de agua con cianuro de sodio, un compuesto altamente tóxico utilizado comúnmente en la extracción de oro. El agua es el recurso natural más abundante en la Tierra, con solo el 2,53% de agua dulce, de la cual la mayor parte se encuentra en glaciares o en aguas subterráneas, y una fracción mínima es accesible en la superficie terrestre (Infraplast, 2015). El uso responsable de este recurso es esencial para la sostenibilidad de los ecosistemas y la supervivencia humana, especialmente en regiones afectadas por la minería.

En el contexto de la minería aurífera, la gestión del agua y el tratamiento de relaves contaminados con cianuro son desafíos críticos. Según Peris y Cuesta (2009), el ser humano consume aproximadamente el 8% del total anual de agua dulce renovable, y una porción significativa de ese consumo se destina a la industria. Los relaves, residuos generados por la minería, contienen sustancias químicas nocivas que, si no son tratadas correctamente, pueden contaminar cuerpos de agua y afectar la biodiversidad y la salud humana.

Uno de los contaminantes más preocupantes en los relaves auríferos es el cianuro de sodio, que se utiliza para disolver y extraer el oro del mineral. La eliminación y neutralización del cianuro es esencial para evitar su acumulación en los ecosistemas acuáticos. El cianuro puede causar efectos tóxicos severos, incluso en concentraciones bajas, por lo que su tratamiento debe ser prioritario en cualquier actividad extractiva.

Diversos métodos han sido implementados para el tratamiento de efluentes cianurados. Entre ellos, los métodos de oxidación son los más eficaces para destruir el cianuro libre, como lo indicaron Huiatt et al. (1983), Wheathington (1988) y Young et al. (1995b) como se cita en Modesto (2014, p. 57). Estos métodos, como la oxidación química mediante el uso de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) o hipoclorito de sodio ($NaOCl$), transforman el cianuro en formas menos tóxicas, como el cianato (CNO^-), que es más estable y menos dañino para el medio ambiente.

El tratamiento con peróxido de hidrógeno, en particular, ha ganado popularidad en los últimos años debido a su alta capacidad de oxidación sin generar subproductos contaminantes. Fernández (2007) señala que el H_2O_2 es ampliamente utilizado en instalaciones metalúrgicas alrededor del mundo para la degradación de cianuros residuales. Este proceso, conocido como el método Kastone, utiliza peróxido de hidrógeno y formaldehído para tratar los residuos de cianuro a temperaturas entre 120 y 130°C, permitiendo también la precipitación de metales pesados como el zinc y el cadmio (Marsden, 1992, citado en Aguilar & Cortina, 2003).

Otra opción comúnmente empleada es el tratamiento con hipoclorito de sodio. Este proceso se basa en la

cloración alcalina del cianuro libre bajo condiciones controladas de pH, generalmente entre 10,5 y 11,5. Como resultado, el cianuro es oxidado y convertido en cianato, que luego se transforma en amoníaco y otros subproductos no tóxicos (Smith & Mudder, 1991, citado en Figueredo et al., 2014). Si bien este método es efectivo, requiere un control riguroso de las condiciones de pH y una cantidad significativa de hipoclorito para asegurar la completa neutralización del cianuro.

Es así que el tratamiento químico de relaves auríferos es un tema de gran relevancia en la industria minera debido a la necesidad de mitigar los impactos ambientales generados por los efluentes contaminados con cianuro de sodio, un compuesto altamente tóxico utilizado en la extracción de oro. La presencia de este contaminante en cuerpos de agua cercanos a las operaciones mineras puede afectar gravemente los ecosistemas acuáticos y la salud humana, lo que subraya la importancia de desarrollar procesos eficientes para su degradación.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la efectividad de un tratamiento químico basado en el uso de hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno, bajo diferentes condiciones de pH, para la degradación del cianuro de sodio en los relaves auríferos generados por la minera Vicus SAC. La justificación de esta investigación radica en la urgente necesidad de implementar tecnologías que no solo aseguren la eliminación del cianuro residual, sino que también minimicen la generación de subproductos tóxicos. Al optimizar este proceso de degradación, se espera contribuir a la sostenibilidad de las actividades mineras, garantizando que los efluentes tratados cumplan con los estándares ambientales internacionales y protejan los recursos hídricos circundantes. Además, la aplicación de estos tratamientos químicos permitirá reducir la dependencia de tecnologías más costosas y complejas, ofreciendo una solución viable y accesible para la industria aurífera.

MÉTODOS

El presente estudio fue de tipo experimental, con un nivel explicativo y un enfoque cuantitativo. Se diseñó con el objetivo de evaluar la influencia de diversas variables (pH, concentración de hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno) en la degradación del cianuro de sodio presente en los relaves auríferos. El enfoque cuantitativo permitió la recolección y análisis de datos numéricos, utilizando herramientas estadísticas para determinar las relaciones causa-efecto entre los factores evaluados y la eficiencia del tratamiento químico.

El estudio se llevó a cabo en el laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, ubicada en la ciudad universitaria del distrito de Huacho, provincia de Huaura, en la región Lima, Perú. La institución se encuentra a una altitud de 105 msnm, con coordenadas geográficas: latitud -11,126256 y longitud -77,6442. Las condiciones ambientales en el laboratorio presentaron

una temperatura promedio de entre 23°C y 27°C, con una humedad relativa del 78% al 82%.

La muestra utilizada para el estudio consistió en relaves auríferos provenientes de las operaciones de la Minera Vicus S.A.C., ubicada en el Centro Poblado Las Minas, distrito de Supe, provincia de Barranca, Lima, a 512 msnm. Las muestras fueron recolectadas en la salida de los efluentes de la minera, antes de ingresar a la relavera. La concentración inicial de cianuro de sodio en el relave fue de 154.44 ppm (0.15444 g/L).

Se utilizó un diseño factorial 2³ para estudiar la

influencia de tres factores: hipoclorito de sodio (NaClO), peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y el pH de la solución. Se establecieron niveles máximos y mínimos para cada factor, además de réplicas en el centro del diseño para obtener una mejor estimación de los efectos de las variables. En total, se realizaron 11 pruebas experimentales: 8 pruebas corresponden a las combinaciones de los niveles alto y bajo de cada factor, y 3 pruebas centrales.

Las variables y sus niveles se detallan en la siguiente tabla 1:

Tabla 1

Variables del diseño natural

Factor	Unidad	Mínimo	Máximo	Centro
Z1: NaClO (Hipoclorito de sodio)	g/L	0,15	0,17	0,16
Z2: H ₂ O ₂ (Peróxido de hidrogeno)	g/L	0,05	0,07	0,16
Z3: Concentración hidrógeno	pH	10	12	11

Para el tratamiento de los relaves, las muestras fueron filtradas antes de su preparación. Se utilizaron volúmenes de 250 mL de relave para cada prueba experimental. Las muestras fueron sometidas a agitación durante 25 minutos, tras lo cual se tomaron alícuotas de 10 mL para su análisis mediante fotometría (fotómetro YSI 9300) siguiendo el método específico para la medición del ácido cianúrico.

El análisis de los datos se realizó utilizando los programas de cálculo Excel y Minitab versión 17. El diseño factorial permitió evaluar el efecto de cada variable y sus interacciones. Se utilizó un nivel de confianza del 95% y un error del 5%. Para determinar la significancia estadística de los factores evaluados, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) y el diagrama de Pareto. El análisis de varianza se llevó a cabo según las recomendaciones de Gutiérrez y De la Vara (2008), Por lo que la ecuación siguiente muestra la variabilidad total de los datos en sus partes componentes. (Montgomery, 2004).

$$SS \text{ Total} = SS \text{ Efectos} + SS \text{ Error}$$

Donde: SS Total=Suma total de cuadrados corregidos.

SS Efectos=Suma de cuadrados debido a los efectos o tratamientos.

SS Error=Suma de cuadrados debido al error.

a.- La suma de cuadrados de los efectos e interacciones está definida por:

$$SS. efecto = \frac{(\sum_{i=1}^j Y_{ij} X_i)^2}{N}$$

Donde:

Xi = Valor de la variable a escala codificada.

Yi = Valor de la respuesta (degradación de cianuro de sodio)

b.- La suma de cuadrados para el error (SS Error) está definido por (Wackerty, Mendenhall & Sheaff 2010, Pag. 601).

$$SS. error = \sum_{i=1}^{no} (\tilde{Y} - \bar{Y})^2$$

Donde:

\tilde{Y} = Réplicas en el punto central del diseño.

no=Número de réplicas en el centro del diseño.

\bar{Y} = Promedio de todas las réplicas.

c.- La suma de cuadrados para la curvatura está dada por:

$$SS. Curvatura = \frac{N \cdot \bar{no} (Y - \bar{Y})^2}{(N - no)}$$

Y=Promedio de los puntos exteriores del diseño

La manera precisa para determinar estadísticamente las variables o factores que pueden ser significativos es por medio del teorema de Cochran el cual se resume en la siguiente expresión (Kuehl, 2001, pág. 187).

$$F_0 = \frac{\left(\frac{SS. Efecto}{f_1} \right)}{\left(\frac{SS. Error}{f_2} \right)}$$

f₁ = Grados de libertad de los efectos e interacciones generalmente iguales a 1.

f₂ = Grados de libertad de la suma de cuadrados del error, lo cual está calculado como la diferencia de los grados de libertad de la suma total de cuadrados menos la suma de los efectos.

f₃ = Grados de libertad de la suma total de cuadrados definido como el número de pruebas experimentales realizadas (incluyendo las réplicas) menos 1.

Un efecto o interacción es significativa si se cumple la siguiente relación:

$$F_o > F_{\alpha, f_1, f_2}$$

Donde:

F_{α, f_1, f_2} - Es el F de tablas, siendo α el nivel de confiabilidad o significancia (generalmente 0,01 o 0,05).

RESULTADOS

Se realizaron 11 pruebas experimentales en base al diseño factorial propuesto, donde se variaron las concentraciones de hipoclorito de sodio, peróxido de hidrógeno y pH, tal como se muestra en la Tabla 2. Las respuestas observadas (degradación del cianuro de sodio) se describen a continuación.

Tabla 2

Matriz del diseño factorial con replicas en el centro y respuestas

N	ESCALA CODIFICADA			ESCALA NATURAL			Y (Obs)
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	
1	-1	-1	-1	.15	.05	10	97,33
2	1	-1	-1	.17	.05	10	97,65
3	-1	1	-1	.15	.07	10	97,33
4	1	1	-1	.17	.07	10	97,26
5	-1	-1	1	.15	.05	12	96,87
6	1	-1	1	.17	.05	12	97,13
7	-1	1	1	.15	.07	12	96,77
8	1	1	1	.17	.07	12	97,29
9	0	0	0	.16	.06	11	97,33
10	0	0	0	.16	.06	11	97,29
11	0	0	0	.16	.06	11	97,36

Los resultados de las pruebas experimentales muestran una alta degradación del cianuro de sodio en todos los casos, con valores que oscilan entre el 96,77% y el 97,65%. La mayor degradación (97,65%) se obtuvo en la segunda prueba, con una concentración de 0,17 g/L de NaClO, 0,05 g/L de H_2O_2 y un pH de 10.

El análisis de la varianza se realizó para evaluar la significancia de los efectos de las variables experimentales (NaClO, H_2O_2 , y pH). Para lo cual se construyeron las figuras de efectos normalizados y el diagrama de Pareto, que se presentan a continuación:

Figura 1

Efectos de significancia normal estandarizada

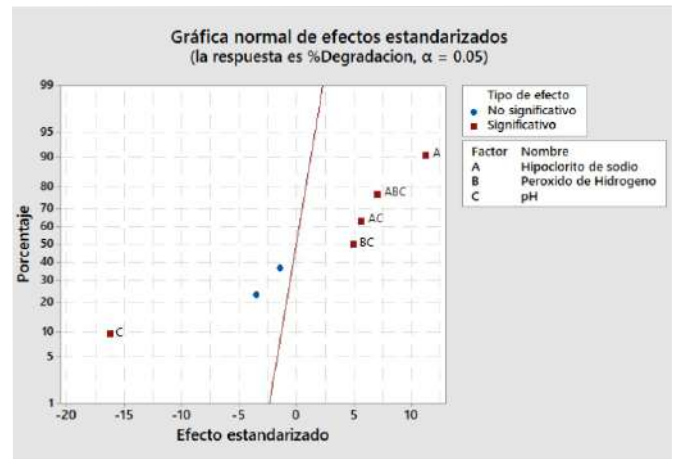
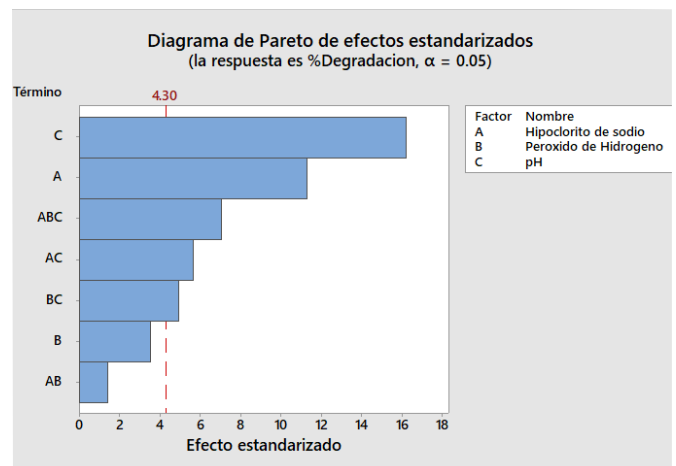


Figura 2

Efectos de significancia con Diagrama de Pareto



En la Figura 1, se aprecia que, para un nivel de confianza del 95%, el hipoclorito de sodio, el pH y las interacciones entre hipoclorito de sodio/pH, peróxido de hidrógeno/pH e hipoclorito de sodio/peróxido de hidrógeno/pH son significativos. Por otro lado, el peróxido de hidrógeno de manera aislada y la interacción entre hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno no mostraron efectos significativos.

En la Figura 2, el diagrama de Pareto confirma que los efectos significativos se encuentran por encima de la línea crítica de 4,30, mientras que los efectos no significativos están por debajo de esta línea.

Tabla 3

Análisis de varianza para el contenido final del cianuro ANOVA (Test-Fisher)

Fuente	SS	g.L	MS	F°	F ⁰ >F(α;gLTgLE)
SSX ₁ =	0,1362	1	0,1362	128,00	Significativo
SSX ₂ =	0,0133	1	0,0133	12,50	No Significativo
SSX ₃ =	0,2814	1	0,2814	264,50	Significativo
SSX ₁ X ₂ =	0,0021	1	0,0021	2,00	No Significativo
SSX ₁ X ₃ =	0,0340	1	0,0340	32,00	Significativo
SSX ₂ X ₃ =	0,0261	1	0,0261	24,50	Significativo
SSX ₁ X ₂ X ₃ =	0,0532	1	0,0532	50,00	Significativo
Curvatura=	0,0326	1	0,0326	30,68	
Error=	0,0021	2	0,0011		
Total=	0,5810	10			

La tabla de ANOVA indica que el hipoclorito de sodio (NaClO), el pH y sus interacciones tienen un efecto significativo sobre la degradación del cianuro de sodio, mientras que el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) no mostró significancia por sí solo.

Los resultados indican que el pH y el hipoclorito de sodio son los factores clave en la degradación del cianuro de sodio, con un porcentaje de degradación óptimo del 97,65%. Aunque el peróxido de hidrógeno no es significativo en aislamiento, sus interacciones con el pH y el hipoclorito de sodio también juegan un rol relevante.

En base a los objetivos planteados, se ha demostrado que el tratamiento químico de relaves auríferos mediante la degradación del cianuro de sodio es eficaz utilizando hipoclorito de sodio (NaClO) y controlando el pH del medio. Los resultados muestran que:

1. Hipoclorito de sodio y pH como factores determinantes: El hipoclorito de sodio (NaClO) y el pH fueron los factores más influyentes en la degradación del cianuro de sodio, alcanzándose una degradación máxima del 97,65%. Esto confirma la hipótesis de que estas dos variables juegan un rol clave en el tratamiento de relaves contaminados con cianuro. En condiciones óptimas de 0,17 g/L de NaClO y un pH de 10, se obtuvo la mayor eficiencia de degradación.

2. El peróxido de hidrógeno tiene un efecto limitado: Si bien se empleó peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en las pruebas, los resultados muestran que este factor, de manera aislada, no tuvo un efecto significativo en la degradación del cianuro. No obstante, las interacciones del H₂O₂ con el pH y el NaClO demostraron ser relevantes en la mejora de los resultados.

3. Significancia estadística de las interacciones: El análisis estadístico, a través de ANOVA y el diagrama de Pareto, confirmó que las interacciones entre el hipoclorito de sodio, el pH y el peróxido de hidrógeno fueron significativas. Esto sugiere que el control simultáneo de

estas variables es esencial para optimizar el proceso de degradación del cianuro en relaves auríferos.

CONCLUSIONES.

Este estudio confirma que la aplicación de hipoclorito de sodio y el control del pH son métodos eficaces para la degradación del cianuro de sodio en relaves auríferos, lo que representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones sostenibles para la gestión de residuos mineros. Sin embargo, se requiere mayor optimización del proceso para cumplir con las normativas ambientales internacionales.

Se recomienda para futuros estudios: Aunque se alcanzó un alto porcentaje de degradación, la calidad del agua tratada aún no cumple con los estándares internacionales establecidos por la OMS y la UE. Por lo tanto, es necesario ajustar las concentraciones de los reactivos y los tiempos de tratamiento para asegurar la eliminación total del cianuro y reducir la concentración residual a niveles seguros para el medio ambiente.

REFERENCIAS.

- Aguilar, M., & Cortina, J. (2006). Tratamientos Activos de Agua Contaminada. En R. Rodríguez, & A. García, *Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente* (pág. 343). Madrid: Ibergraphi 2002.
- Fernández, B. (2007). *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina*. Recuperado el 09 de 02 de 2018, de Tesis Doctorales en Red - TDR : http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/31849/UV0080TBFP_1.pdf?sequence=1
- Figueredo, M., Delgado, B., Montejó, M., Castellanos, J., Lubian, T., Alcalá, A., & Ávila, Y. (03 de 06 de 2014). *Tratamiento de efluentes cianurados en una planta hidrometalúrgica de oro*. Recuperado el 09 de 02 de 2018, de CIPIMM: <http://www.cipimm.co.cu/revista-info/descargas/1-2014/4->

ARTICULO%203%20pp.21-32.pdf

Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill Interamericana Editores S.A.

Infraplast. (29 de 08 de 2015). *Agua en el mundo*. Obtenido de Soluciones sustentables: <http://www.infraplast.cl/se-presume-un-deficit-de-agua-del-40-en-2030-si-no-cambia-el-consumo>

Modesto, V. (18 de 02 de 2014). *Estudio de investigación para la el tratamiento de soluciones residuales del proceso de cianuración mediante la aplicación de sistemas pasivos de la empresa minera el Misti Gold*

S.A.C. Obtenido de Repositorio Institucional Digital U N S A : <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2614/IMveammf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Montgomery, D. (2004). *Diseño y Analisis de Experimento*. Mexico D.F.: LIMUSAS.A.

Peris, J., & Cuesta, P. (2009). *La tutela penal del agua*. Madrid: Dykinso S.L.

YPT282-9300-9500-manual-with-test-procedures.pdf. (s. f.).

