

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA - ESCUELA DE
POSGRADO
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS AMBIENTALES



DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS EN INGENIERÍA Y CIENCIAS
AMBIENTALES

Actividad: Trabajo encargado de teoría

Docente:

Ph.D. Christian René Encina Zelada

Presenta:

José Augusto Zevallos Ruiz

Lima – Perú

08 de octubre del 2024

I. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio, se llevará a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar los efectos de distintos tratamientos de pastoreo sobre las concentraciones de $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ y fósforo (P) en suelos de una pradera alpina en la meseta de Zoige, China. Los tratamientos considerados en este estudio incluyen cuatro intensidades de pastoreo: G0 (sin pastoreo), G0.7 (pastoreo ligero), G1.2 (pastoreo moderado) y G1.6 (pastoreo intensivo), como se describe en el artículo base. El objetivo del análisis es determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a los niveles de nitrógeno y fósforo en el suelo, elementos críticos en la regulación de los flujos de N_2O , como sugieren estudios previos (Zhan et al., 2021).

El ANOVA es una técnica estadística que permite comparar medias entre varios grupos y es útil en experimentos de diseño completamente aleatorizado (DBCA). Este método ha sido ampliamente utilizado en estudios de ecología y ciencias del suelo para evaluar los efectos de tratamientos sobre múltiples variables de respuesta. En este trabajo, se utilizará el bloque $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ y P como las principales variables de respuesta, mientras que los tratamientos G0, G0.7, G1.2 y G1.6 constituirán los niveles del factor a evaluar. Los resultados se analizarán utilizando software estadístico R, complementado con hojas de cálculo de Excel para la organización de los datos.

Se espera que los niveles de $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ y $\text{NO}_3\text{-N}$, dos formas clave de nitrógeno en el suelo, muestren respuestas diferenciadas a las intensidades de pastoreo debido a la influencia del pisoteo y la deposición de excrementos animales, como lo han indicado estudios similares en praderas alpinas (Luo et al., 2008). Además, se analizará la interacción entre el contenido de fósforo en el suelo y los tratamientos de pastoreo, ya que el fósforo disponible ha sido identificado como un factor clave en los procesos de nitrificación y descomposición del nitrógeno en sistemas de pastoreo (Rui et al., 2012).

Los análisis estadísticos incluirán pruebas post hoc para identificar diferencias específicas entre los tratamientos, lo que permitirá una interpretación más detallada de los efectos del pastoreo en la calidad del suelo. Se espera que este enfoque permita generar conclusiones sólidas sobre la gestión sostenible de pastizales en la

región estudiada, contribuyendo a la comprensión de las emisiones de gases de efecto invernadero en función de la intensidad del pastoreo (Zhan et al., 2021).

Este análisis será esencial para comprender las implicaciones a largo plazo de diferentes estrategias de manejo del pastoreo, especialmente en ecosistemas vulnerables como los de la meseta tibetana. Las conclusiones obtenidas podrían tener aplicaciones en la gestión de praderas en otras regiones montañosas del mundo, donde la sostenibilidad y la conservación de suelos ricos en nutrientes son prioridades clave para la producción ganadera y la mitigación del cambio climático.

II. MARCO TEÓRICO

Diseño Completamente al Azar (DBCA)

El Diseño Completamente al Azar (DBCA) es un diseño experimental en el cual las unidades experimentales se asignan aleatoriamente a los tratamientos, sin ninguna restricción. Es el diseño más sencillo de experimentación, útil cuando las unidades experimentales son homogéneas y se puede asumir que las diferencias entre ellas se deben únicamente a los tratamientos. Su ecuación básica para modelar los datos es:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} es la observación en la unidad experimental jjj que recibe el tratamiento iii ,
- μ es la media general,
- τ_i es el efecto del tratamiento i ,
- β_j es el efecto del bloque j ,
- ϵ_{ij} es el error aleatorio asociado con la unidad experimental j bajo el tratamiento i .

El análisis de los datos se realiza típicamente usando un ANOVA para determinar si hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos.

ANOVA (Análisis de varianza)

El análisis de varianza (ANOVA) es un método estadístico que permite comparar las medias de varios grupos para determinar si hay diferencias significativas entre ellas. ANOVA descompone la variabilidad total en dos componentes: la variabilidad entre los grupos y la variabilidad dentro de los grupos. La ecuación para el ANOVA de un solo factor es:

$$F = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_{error}}$$

Donde:

- F es la estadística de prueba de Fisher,
- $MS_{tratamientos}$ es la media de los cuadrados entre los tratamientos,
- MS_{error} es la media de los cuadrados del error.

Si el valor de F es significativamente grande, se concluye que existen diferencias significativas entre las medias de los grupos.

Prueba Kolmogórov-Smirnov

La prueba de Kolmogórov-Smirnov es una prueba no paramétrica que evalúa si una muestra sigue una distribución específica. Es utilizada para verificar la normalidad de los datos en un análisis ANOVA. La estadística de prueba DDD para esta prueba es:

$$D = \sup |F_n(x) - F(x)|$$

Donde:

- $F_n(x)$ es la función de distribución empírica de la muestra,
- $F(x)$ es la función de distribución acumulada teórica.

Si el valor de D es suficientemente grande, se rechaza la hipótesis nula de que los datos siguen la distribución especificada.

Prueba de Bartlett

La prueba de Bartlett es un test estadístico que evalúa la homogeneidad de las varianzas entre varios grupos. Es utilizada comúnmente en ANOVA para verificar que las varianzas sean homogéneas, lo cual es un supuesto clave. La estadística de prueba de Bartlett es:

$$B^2 = \frac{(N - k) \ln(s_p^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(s_i^2)}{1 + \frac{1}{3(k+1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n-1} - \frac{1}{N-k} \right)}$$

Donde:

- N es el número total de observaciones,
- k es el número de grupos,
- s_p^2 es la varianza ponderada,
- s_i^2 es la varianza del grupo i ,
- n_i es el tamaño de muestra del grupo i .

Un valor grande de B^2 indica heterogeneidad de varianzas entre los grupos.

Prueba de Tukey

La prueba de Tukey es una prueba post hoc utilizada después del ANOVA para realizar comparaciones múltiples entre las medias de los grupos. Esta prueba controla el error tipo I para todas las comparaciones. La estadística de prueba es:

$$q = \frac{\bar{Y}_i - \bar{Y}_j}{\sqrt{\frac{MS_{error}}{n}}}$$

Donde:

- \bar{Y}_i y \bar{Y}_j son las medias de los tratamientos i y j ,
- MS_{error} es la media de los cuadrados del error del ANOVA,
- n es el número de observaciones por grupo
- $\bar{Y}_i - \bar{Y}_j$ es la Diferencia Mínima Significativa (DMS)

La prueba de Tukey se utiliza para identificar qué pares de medias son significativamente diferentes entre sí.

Prueba de Durbin-Watson

La prueba de Durbin-Watson es una prueba estadística utilizada para detectar la autocorrelación en los residuos de un modelo de regresión. Su estadística de prueba es:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$$

Donde:

- e_t son los residuos,
- n es el número de observaciones

Un valor cercano a 2 indica que no hay autocorrelación en los residuos, mientras que valores alejados de 2 sugieren la presencia de autocorrelación.

III. METODOLOGÍA

4.1. Descripción de las bases de la información analizada

La información analizada en este estudio proviene de un diseño experimental realizado en praderas alpinas, cuyo objetivo principal es evaluar los efectos de diferentes intensidades de pastoreo sobre variables clave del suelo, como el amonio ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), el nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) y el fósforo (P). Estos nutrientes son indicadores críticos de la fertilidad del suelo y tienen un papel significativo en los ciclos biogeoquímicos que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero, como el óxido nitroso (N_2O).

La base de datos está compuesta por las mediciones tomadas en un experimento de campo que duró dos años (2013-2014), en el cual se utilizaron cuatro tratamientos de pastoreo: sin pastoreo (G0), pastoreo ligero (G0.7), pastoreo moderado (G1.2) y pastoreo intensivo (G1.6). Las parcelas experimentales fueron monitoreadas para registrar variaciones estacionales y anuales en las concentraciones de $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ y P en el suelo.

La información fue recopilada utilizando métodos de muestreo estándar, como el análisis de los nutrientes en suelo mediante cromatografía y la medición de las emisiones de N_2O mediante cámaras estáticas. Los datos se procesaron y analizaron en software estadístico R y Excel, aplicando análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos, así como pruebas adicionales para verificar los supuestos del modelo, como la normalidad (Kolmogorov-Smirnov) y la homogeneidad de varianzas (prueba de Bartlett). Además, se aplicaron comparaciones múltiples post hoc mediante la prueba de Tukey para identificar qué pares de medias presentaban diferencias significativas.

4.2. Metodología empleada

El diagrama metodológico presentado en la figura muestra el flujo de trabajo seguido en el análisis de datos del artículo. Los datos fueron organizados en bloques como paso previo al análisis estadístico. Inicialmente, los datos se procesaron utilizando dos herramientas: R y Excel. El uso de Excel permitió un cálculo detallado, proporcionando transparencia en el proceso y evitando que se convirtiera en una "caja negra", como a veces puede suceder con las funciones automáticas de R.

A continuación, se aplicaron diversas pruebas estadísticas para evaluar los resultados. Entre las pruebas aplicadas, se incluyen el análisis de varianza (ANOVA), la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad, la prueba de Bartlett para verificar la homogeneidad de varianzas, la prueba de Durbin-Watson para detectar autocorrelación en los residuos, y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey. Finalmente, los resultados de estas pruebas se visualizaron para una interpretación clara y comprensible de los efectos y diferencias entre los tratamientos. Este enfoque, que combina el procesamiento en R y Excel, proporciona tanto precisión como claridad en la organización y análisis de los datos.

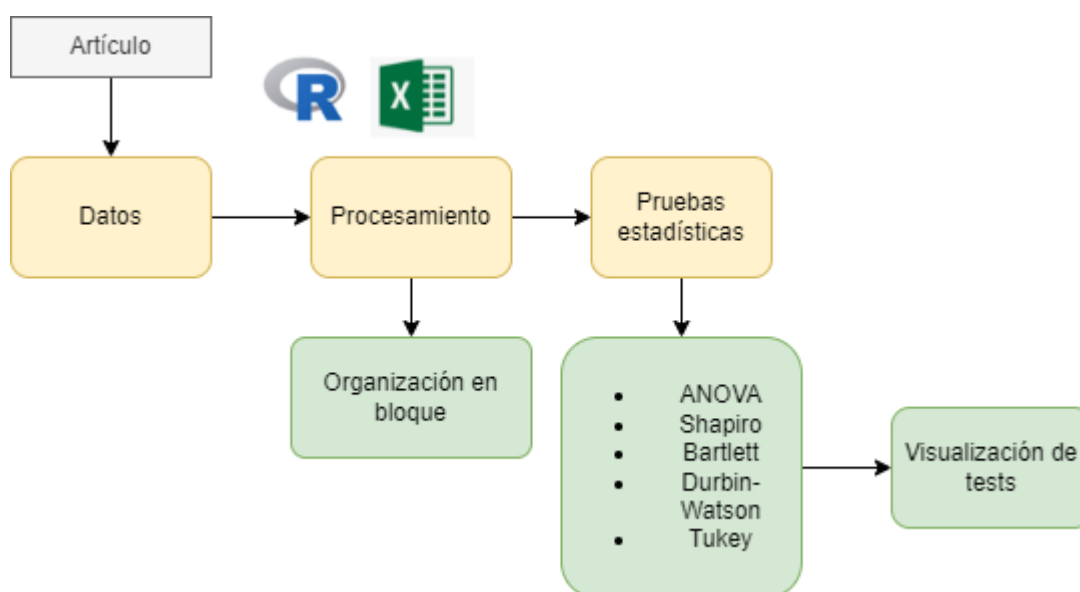


Figura 1 Flujograma metodológico empleado en el presente trabajo

4.3. Datos

La tabla de datos presenta las concentraciones de NH_4^+-N , NO_3-N y fósforo (P) en el suelo, medidas bajo cuatro intensidades de pastoreo: G0 (sin pastoreo), G0.7 (pastoreo ligero), G1.2 (pastoreo moderado) y G1.6 (pastoreo intensivo), con tres repeticiones por tratamiento. Las concentraciones de NH_4^+-N oscilan entre 1.07 y 1.48 mg/kg, mientras que las de NO_3-N varían entre 0.066 y 0.126 mg/kg, y las de P entre 0.82 y 1.82 mg/kg. Los datos sugieren una variabilidad en los niveles de nutrientes del suelo en función de la intensidad de pastoreo, lo que indica una posible relación entre la intensidad de pastoreo y la disponibilidad de estos nutrientes en el suelo.

Psuelo	Intensidad_Pastoreo	Valor	Psuelo	Intensidad_Pastoreo	Valor
NH4+-N	G0	1.18	NO3-N	G1.2	0.092
NH4+-N	G0	1.26	NO3-N	G1.2	0.1
NH4+-N	G0	1.34	NO3-N	G1.2	0.108
NH4+-N	G0.7	1.07	NO3-N	G1.6	0.07
NH4+-N	G0.7	1.13	NO3-N	G1.6	0.08
NH4+-N	G0.7	1.19	NO3-N	G1.6	0.09
NH4+-N	G1.2	1.16	P	G0	0.82
NH4+-N	G1.2	1.22	P	G0	0.86
NH4+-N	G1.2	1.28	P	G0	0.9
NH4+-N	G1.6	1.26	P	G0.7	1.66
NH4+-N	G1.6	1.37	P	G0.7	1.74
NH4+-N	G1.6	1.48	P	G0.7	1.82
NO3-N	G0	0.066	P	G1.2	1.1
NO3-N	G0	0.07	P	G1.2	1.14
NO3-N	G0	0.074	P	G1.2	1.18
NO3-N	G0.7	0.114	P	G1.6	1.3
NO3-N	G0.7	0.12	P	G1.6	1.42
NO3-N	G0.7	0.126	P	G1.6	1.54

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Análisis de Varianza (ANOVA)

El análisis ANOVA muestra que tanto la intensidad de pastoreo como el tipo de nutriente del suelo (NH4+-N, NO3-N, y P) tienen efectos significativos sobre los valores observados. La intensidad de pastoreo tiene un efecto significativo ($p = 0.0192$), lo que indica que las concentraciones de nutrientes del suelo varían en función del nivel de pastoreo. Sin embargo, el tipo de nutriente es el factor más influyente, con una significancia extremadamente alta ($p < 2e-16$), lo que sugiere diferencias notables entre las concentraciones de NH4+-N, NO3-N y P.

Además, el tipo de nutriente explica una mayor proporción de la variabilidad en los datos, con una suma de cuadrados mucho mayor (11.057) en comparación con la intensidad de pastoreo (0.410). En conjunto, estos resultados sugieren que, aunque la intensidad del pastoreo afecta los nutrientes del suelo, el comportamiento de cada nutriente es el principal factor que influye en las diferencias observadas.

Los resultados obtenidos son similares en R y en Excel

Proceso de cálculo:

$$b = 3; r = 3; t = 4;$$

$$N = b * r * t = 36$$

Hallando la suma de cuadrados totales (SS_{total}):

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 = 12.5309$$

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{N} = 0.876$$

Hallando la suma de cuadrados de tratamiento ($SS_{tratamiento}$):

$$SS_{tratamiento} = \sum_{k=1}^9 \sum_{t=1}^4 (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2$$

Donde:

- \bar{Y}_t es el promedio de muestra de cada tratamiento (Pastoreo intenso)

	G0	G0.7	G1.2	G1.6
\bar{Y}_t	0.73	0.99666667	0.82	0.95666667

$$SS_{tratamiento} = 0.4097$$

Hallando la suma de cuadrados del bloque (SS_{bloque}):

$$SS_{bloque} = \sum_{k=1}^{12} \sum_{b=1}^3 (\bar{Y}_b - \bar{Y})^2$$

Donde:

- \bar{Y}_b es el promedio de muestra de cada bloque (Propiedad del suelo)

	NH4+-N	NO3-N	P
\bar{Y}_b	1.245	0.0925	1.29

$$SS_{bloque} = 11.0572$$

Hallando la suma de cuadrados de los residuos ($SS_{residuos}$):

$$e_i = Y_i - (\bar{Y}_t + \bar{Y}_b - \bar{Y})$$

$$SS_{residuos} = \sum_{i=1}^N e_i^2 = 1.0641$$

Grados de libertad (G.L):

	Tratamiento	Bloque	Residuos
G.L	3	2	30

Hallando los promedios de sumas de cuadrados (*Mean sq*):

$$Means\ sq_{tratamiento} = \frac{SS_{tratamiento}}{G.L_{tratamiento}} = 0.1366$$

$$Means\ sq_{bloque} = \frac{SS_{bloque}}{G.L_{bloque}} = 5.5286$$

$$Means\ sq_{residuos} = \frac{SS_{residuos}}{G.L_{residuos}} = 0.0355$$

Hallando los valores de F:

$$F_{tratamiento} = \frac{Means\ sq_{tratamiento}}{Means\ sq_{residuos}} = \frac{0.1366}{0.0355} = 3.85$$

$$F_{bloque} = \frac{Means\ sq_{bloque}}{Means\ sq_{residuos}} = \frac{5.5286}{0.0355} = 155.86$$

```
> res.aov <- aov(Valor ~ Intensidad_Pastoreo + Psuelo, data = data_expanded)
> summary(res.aov)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Intensidad_Pastoreo	3	0.410	0.137	3.85	0.0192 *
Psuelo	2	11.057	5.529	155.87	<2e-16 ***
Residuals	30	1.064	0.035		

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Prueba Kolmogórov-Smirnov

Para el test de normalidad se tiene $F_n(x)$ = distribución normal muestral, $F(x)$ = distribución teórica Weibull.

De la siguiente expresión se obtuvo que:

$$D = \sup |F_n(x) - F(x)| = 0.00947$$

El valor de $D_{crítico}$:

$$D_{crítico} = \frac{1.36}{\sqrt{N}} = 0.22$$

Como el valor de D no supera al $D_{crítico}$, se concluye que los residuos si cumplen el criterio de normalidad.

Prueba de Bartlett

Se aplicó el test de Bartlett para el tratamiento y el bloque de manera independiente.

Los procedimientos de cálculos se detallan a continuación:

Hallando B para el tratamiento:

$$k = 4$$

$$N = 36$$

	G0	G0.7	G1.2	G1.6
s_i^2	0.246248	0.44851911	0.26143644	0.3906
n_i	9	9	9	9

Hallando s_p^2 :

$$s_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^4 (n_i - 1) s_i^2}{N - 4} = 0.3367$$

Remplazando en:

$$B_{tratamiento}^2 = \frac{(N - k) \ln(s_p^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(s_i^2)}{1 + \frac{1}{3(k+1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N - k} \right)}$$

$$B_{tratamiento}^2 = \frac{32 \ln(0.3367) - \sum_{i=1}^4 (n_i - 1) \ln(s_i^2)}{1 + \frac{1}{15} \left(\sum_{i=1}^4 \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{32} \right)} = 0.9931$$

El p valor estimado con la distribución chi cuadrado en Excel:

$$p - \text{valor} = 0.8029$$

Hallando B para el bloque:

$$k = 3$$

$$N = 36$$

	NH4+-N	NO3-N	P
s_i^2	0.01170833	0.00040475	0.1107
n_i	12	12	12

Hallando s_p^2 :

$$s_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 (n_i - 1) s_i^2}{N - 4} = 0.04093$$

Remplazando en:

$$B_{bloque}^2 = \frac{(N - k) \ln(s_p^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(s_i^2)}{1 + \frac{1}{3(k+1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n-1} - \frac{1}{N-k} \right)}$$

$$B_{bloque}^2 = \frac{(33) \ln(0.04093) - \sum_{i=1}^3 (n_i - 1) \ln(s_i^2)}{1 + \frac{1}{12} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{1}{n-1} - \frac{1}{33} \right)} = 51.526$$

El p valor estimado con la distribución chi cuadrado en Excel:

$$p - valor = 6.47 * 10^{-12}$$

En el análisis de varianza, se observó que la **Intensidad de Pastoreo** tiene un efecto significativo en los valores observados ($p=0.0192$), lo que indica que los diferentes niveles de pastoreo generan diferencias en los parámetros medidos. Sin embargo, las varianzas dentro de cada nivel de pastoreo son homogéneas ($p=0.8029$, Test de Bartlett), lo que sugiere una consistencia en la dispersión de los datos entre los tratamientos. Por otro lado, el bloque definido por la propiedad del suelo (**Psuelo**) mostró diferencias significativas en las varianzas ($p \approx 6.47 * 10^{-12}$), lo que sugiere que las propiedades del suelo influyen de manera diferenciada en la dispersión de los datos, afectando los resultados generales del análisis.

Prueba de Durbin-Watson

La prueba de Durbin-Watson es una prueba estadística utilizada para detectar la autocorrelación en los residuos de un modelo de regresión. En este caso, el valor de Durbin-Watson es 1.0659, con un p-valor de 0.0001056. Dado que el p-valor es muy bajo (menor que el umbral común de significancia de 0.05), se rechaza la hipótesis nula de que no hay autocorrelación. El valor de 1.0659 está cerca de 1, lo que sugiere una autocorrelación positiva de primer orden en los residuos, es decir, existe una relación entre los errores residuales consecutivos en el modelo. Esto indica que los residuos no son independientes, lo cual puede ser un problema para la validez de los resultados del análisis ANOVA, ya que una de las suposiciones clave es la independencia de los errores.

$$d = \frac{\sum_{t=2}^N (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^N e_t^2} = 1.065$$

Prueba de Tukey

Hallando Tukey para tratamientos:

$$MS_{error} = 0.03546$$

$$n = 9$$

Para una significancia de 0.05, 4 tratamientos y 30 grados de libertad de los residuos se tiene que:

$$q = 3.8454$$

$$q = \frac{DMS_{tratamiento}}{\sqrt{\frac{MS_{error}}{n}}}$$

$$DMS_{tratamiento} = 0.2414$$

Diferencias absolutas entre tratamientos:

Diferencias Absolutas	valor	¿Es mayor a $DMS_{tratamiento}$?
G0-G0.7	0.2666667	VERDADERO
G0-G1.2	0.09	FALSO
G0-G1.6	0.2266667	FALSO
G0.7-G1.2	0.1766667	FALSO
G0.7-G1.6	0.04	FALSO
G1.2-G1.6	0.1366667	FALSO

Grupos obtenidos:

Tratamiento	Grupo
G0	a
G0.7	b
G1.2	ab
G1.6	ab

Hallando Tukey para bloques:

$$MS_{error} = 0.03546$$

$$n = 12$$

Para una significancia de 0.05, 3 bloques y 30 grados de libertad de los residuos se tiene que:

$$q = 3.4864$$

$$q = \frac{DMS_{bloque}}{\sqrt{\frac{MS_{error}}{n}}}$$

$$DMS_{bloque} = 0.1895$$

Diferencias absolutas entre bloques:

Diferencias Absolutas	valor	¿Es mayor a DMS_{bloque} ?
(NH ₄ ⁺ -N)-NO ₃ -N	1.1525	VERDADERO
(NH ₄ ⁺ -N)-P	0.045	FALSO
(NO ₃ -N)-P	1.1975	VERDADERO

Grupos obtenidos:

Bloque	Grupo
NH ₄ ⁺ -N	a
NO ₃ -N	b
P	a

En el **Test de Tukey** para los tratamientos (Intensidad de Pastoreo), se encontró que solo **G0** y **G0.7** son significativamente diferentes, mientras que **G1.2** y **G1.6** no presentan diferencias significativas entre ellos ni con los demás tratamientos. Los tratamientos se agrupan en dos grupos: **G0** en el grupo "a" y **G0.7** en el grupo "b", con **G1.2** y **G1.6** compartiendo el grupo "ab", indicando que no son significativamente diferentes.

Para los bloques (Psuelo), se identificó que **NO₃-N** es significativamente diferente de **NH₄⁺-N** y **P**, mientras que no hay diferencias significativas entre **NH₄⁺-N** y **P**, agrupándose ambos en el mismo grupo "a" y **NO₃-N** en el grupo "b".

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis ANOVA mostró que tanto la **Intensidad de Pastoreo** como el **Tipo de Suelo (Psuelo)** tienen un efecto significativo sobre la variable dependiente. Esto indica que existen diferencias importantes entre los distintos niveles de intensidad de pastoreo y entre los tipos de suelos. En particular, el tipo de suelo influye de manera más pronunciada, como se observó en los resultados. Los residuos del modelo cumplen con la suposición de normalidad, y no se encontró evidencia de problemas de homogeneidad de varianzas en la intensidad de pastoreo; sin embargo, las varianzas no son homogéneas entre los tipos de suelos, lo que podría sugerir una revisión adicional de este factor.

La prueba de Tukey confirmó diferencias significativas entre los grupos de **Intensidad de Pastoreo**, destacando que algunos tratamientos, como G0 y G0.7, son significativamente diferentes, mientras que G1.2 y G1.6 forman un grupo intermedio que no se diferencia claramente de los otros. En cuanto a los suelos, **NO₃-N** es significativamente diferente de **NH₄⁺-N** y **P**, que, por su parte, no presentan diferencias importantes entre sí.

Por último, el test de Durbin-Watson reveló la presencia de autocorrelación positiva en los residuos del modelo, lo que sugiere una dependencia en los errores que podría afectar la validez de los resultados. Aunque el modelo ANOVA es adecuado en muchos aspectos, la autocorrelación y la falta de homogeneidad de varianzas para el tipo de suelo podrían requerir ajustes o una revisión adicional del modelo.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Luo, J., Ledgard, S. F., De Klein, C. A. M., Lindsey, S. B., & Kear, M. (2008). Effects of dairy farming intensification on nitrous oxide emissions. *Plant and Soil*, 309(1–2), 227–237. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9444-9>
- Rui, Y., Wang, Y., Chen, C., Zhou, X., Wang, S., Xu, Z., Duan, J., Kang, X., Lu, S., & Luo, C. (2012). Warming and grazing increase mineralization of organic P in an alpine meadow ecosystem of Qinghai-Tibet Plateau, China. *Plant and Soil*, 357(1), 73–87. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1132-8>
- Zhan, W., Yang, Z., Liu, J., Chen, H., Yang, G., Zhu, E., Hu, J., Jiang, L., Liu, L., Zhu, D., He, Y., Zhao, C., Xue, D., & Peng, C. (2021). Effect of grazing intensities on soil N₂O emissions from an alpine meadow of Zoige plateau in China. *Atmosphere*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/atmos12050541>

VII. ANEXOS

Cálculo de los valores de q_{tukey} para tratamiento y bloque.

```
# Datos necesarios Tratamiento
alpha <- 0.05      # Nivel de significancia
a <- 4             # Número de tratamientos
df_error <- 30     # Grados de libertad asociados al error (v)

# Obtención del valor crítico de q
q_critico <- qtukey(p = 1 - alpha, nmeans = a, df = df_error)

# Mostrar el valor crítico de q
q_critico

# Datos necesarios Bloque
alpha <- 0.05      # Nivel de significancia
a <- 3             # Número de bloques
df_error <- 30     # Grados de libertad asociados al error (v)

# Obtención del valor crítico de q
q_critico <- qtukey(p = 1 - alpha, nmeans = a, df = df_error)

# Mostrar el valor crítico de q
q_critico
```