ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS GELES POLIMÉRICOS EN PROCESOS DE INYECCIÓN DE AGUA

GUSTAVO ADOLFO MAYA TORO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2014

ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS GELES POLIMÉRICOS EN PROCESOS DE INYECCIÓN DE AGUA

GUSTAVO ADOLFO MAYA TORO

Trabajo de grado presentado para optar por el título de magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

M.Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
Director

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2014

DEDICATORIA

A Dios, porque sin Él nada de esto sería posible.

Mis Padres, porque han sido fuente enorme de aprendizaje y pronto faro en el camino.

Mi Esposa, Cielo, por ser la gran fuente de inspiración.

Mis hijos, Nicolás y Sebastián, por ser un enorme motor cada día.

A Rubén Castro, por creer en mi cuando yo mismo no apostaba nada.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar sus agradecimientos a:

La Universidad Industrial de Santander y todas las enseñanzas adquiridas en esta Alma Mater. En especial al profesor Samuel Fernando Muñoz, porque demuestra que unas pocas palabras pueden ser muy poderosas.

A ECOPETROL S.A., por todo el apoyo.

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para la generación de este trabajo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 18
1.RECOBRO MEJORADO MEDIANTE INYECCIÓN DE QUÍMICOS 21
1.1 Definición de recobro químico 21
1.2 Polímeros (P) 22
1.3 Surfactantes (S) 24
1.4 Álcali (A) 26
1.5 Métodos combinados de recobro químico 27
2.CONFORMANCE 28
2.1 Definición 28
2.2 Sistemas coloidales 29
2.3 Soluciones poliméricas (HPAM) para *conformance* 30
3.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ESTRATEGIA DE ANÁLISIS 34
3.1 Pruebas experimentales 34
3.1.1 Pruebas tipo Sydansk 36
3.1.2 Pruebas tipo Sydansk cortas, ultravioleta (UV) y reología 36
3.1.3 Pruebas de desplazamiento en paralelo 37
3.2 Modelamiento numérico 38
4.PRUEBAS CONVENCIONALES PARA GELES POLIMÉRICOS (SYDANSK) 39
4.1 Polímeros y caracterización de polímeros (control de calidad) 39
4.2 Resultados de los análisis 41
5.PRUEBAS NO CONVENCIONALES PARA DE GELES POLIMÉRICOS 52
5.1 Pruebas tipo Sydansk cortas (12 horas) 53
5.2 Pruebas de espectro ultravioleta (UV) 56
5.3 Efecto de iones Ca^{++}, Mg^{++} y Fe^{++} sobre la formación de gel polimérico 65
5.4 Reología de geles poliméricos 71
5.5 Velocidad de reacción en función de G' 76
5.6 Pruebas reológicas, UV y Sydansk para geles poliméricos 78
6.PRUEBAS FLUIDO – ROCA EN GELES POLIMÉRICOS 81
6.1 Selección de corazones 81

6.2 Restauración de mojabilidad 83
6.3 Prueba de desplazamiento con *plugs* en paralelo 85
6.4 Pérdida de inyectividad 89
7.SIMULACIÓN NUMÉRICA 91
7.1 Modelo físico e inicialización 91
7.2 Modelo químico 92
7.3 Ajuste numérico 95
7.4 Casos de análisis 97
CONCLUSIONES 105
RECOMENDACIONES 108
BIBLIOGRAFÍA 109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de inyección tradicional para un *polymer flood.* 23
Figura 2. Mecanismo de un *surfactant flood*. 25
Figura 3. Algunos problemas de *conformance*.....28
Figura 4. Nombres usados para designar algunos sistemas coloidales. 30
Figura 5. Código de Sydansk.....35
Figura 6. Diseño experimental inicial. 36
Figura 7. Esquema de equipo con *core holder* en paralelo para estudio fluido - roca.....37
Figura 8. Control de calidad polímero 1. 40
Figura 9. Control de calidad polímero 2. 41
Figura 10. Algunas soluciones preparadas con P1.....46
Figura 11. Dispersión de los resultados obtenidos. 47
Figura 12. Efecto de la temperatura sobre reacciones específicas.....47
Figura 13. Efecto de [Poly], a temperatura constante, sobre reacciones específicas.....48
Figura 14. Efecto de [*x-linker*] y temperatura a [NaCl] constante.....48
Figura 15. Efecto de [NaCl] y temperatura a [*x-linker*] constante.....49
Figura 16. Efecto de [NaCl] y [*x-linker*] a temperatura constante.....49
Figura 17. Efecto de [Poly] y [*x-linker*] a [NaCl] y T constante, al tiempo final de observación.....50
Figura 18. Efecto de [Poly] y [NaCl] a [*x-linker*] y T constante. 50
Figura 19. Resultados código Sydansk 12 horas con variación de la T.....54
Figura 20. Resultados código Sydansk 12 horas con variación de la T.....55
Figura 21. Resultados código Sydansk 12 horas con variación de [NaCl] a T constante. 56
Figura 22. Espectro UV típico de la mezcla bajo estudio.....56
Figura 23. Acercamiento a la figura 22 cerca a los 570 nanómetros. 57
Figura 24. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx01.....58

Figura 25. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx02.....58
Figura 26. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx03.....59
Figura 27. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx04.....59
Figura 28. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx05.....59
Figura 29. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx06.....60
Figura 30. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx07.....60
Figura 31. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx07-1...60
Figura 32. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx08.....61
Figura 33. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx09.....61
Figura 34. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx10.....61
Figura 35. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx11.....62
Figura 36. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx12.....62
Figura 37. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx12-1...62
Figura 38. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx13.....63
Figura 39. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx13-1...63
Figura 40. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx14.....63
Figura 41. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx15.....64
Figura 42. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx16.....64
Figura 43. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx16-1...64
Figura 44. Diseño experimental para pruebas con Ca^{++}, Mg^{++} y Fe^{++}.....66
Figura 45. Resultados UV y Sydansk para la prueba 1. 67
Figura 46. Resultados UV y Sydansk para la prueba 2. 67
Figura 47. Resultados UV y Sydansk para la prueba 3. 68
Figura 48. Resultados UV y Sydansk para la prueba 4. 68
Figura 49. Resultados UV y Sydansk para la prueba 5. 69
Figura 50. Resultados UV y Sydansk para la prueba 6. 69
Figura 51. Resultados UV y Sydansk para la prueba 7. 70
Figura 52. Resultados UV y Sydansk para la prueba 8. 70
Figura 53. Barrido de frecuencia para selección de valor de prueba. 73

Figura 54. Resultados de prueba reológica. 75
Figura 55. Inicio y fin de la formación de gel polimérico. 75
Figura 56. G' y ángulo de desfase mostrando una reacción de seudo-primer orden.....77
Figura 57. Obtención de la velocidad de la reacción bajo estudio. 78
Figura 58. Comparativo pruebas reológicas y UV.....79
Figura 59. Comparativo pruebas reológicas y tipo Sydansk. 79
Figura 60. Análisis de registros.....82
Figura 61. Tomografía del intervalo seleccionado. 82
Figura 62. Montaje del equipo con los *plugs* seleccionados. 83
Figura 63a. Kabs W para la muestra 8211.5'.....84
Figura 63b. Keo para la muestra 8211.5'.....85
Figura 64. Perfil de inyección durante obtención de línea base (sin tratamiento polimérico). 87
Figura 65. Perfil de inyección luego de tratamiento con gel polimérico. 88
Figura 66. Perfil de inyección antes y después de tratamiento con gel polimérico. 89
Figura 67. Modelo físico 3D. 91
Figura 68. Inicialización del modelo de simulación. 92
Figura 69. Ventana de componentes en CMG.....93
Figura 70. Ventana de reacciones químicas en CMG.....94
Figura 71. Ventana de adsorción de componentes en CMG. 94
Figura 72. Ajuste de la tasa de inyección pre y post tratamiento polimérico.....96
Figura 73. Ajuste del aceite acumulado sin y con tratamiento polimérico.....97
Figura 74. Factor de recobro para todo el arreglo.....98
Figura 75. Análisis del orden de reacción. 99
Figura 76. Análisis del factor de frecuencia de reacción.....101
Figura 77. Modelo de simulación convencional para ajuste de prueba con *plugs* en paralelo. 102

Figura 78. Modelo de simulación convencional para ajuste de prueba con *plugs* en paralelo. 103
Figura 79. Ajuste de tasa de inyección sin reacción química.....103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de análisis tipo Sydansk a 4.000 PPM. 42
Tabla 2. Resultados de análisis tipo Sydansk a 6.000 PPM. 43
Tabla 3. Resultados de análisis tipo Sydansk a 8.000 PPM. 44
Tabla 4. Reacciones seleccionadas por la rápida formación y τ final del gel. 53
Tabla 5. Resultados código Sydansk 12 horas. 53
Tabla 6. Resultados obtenidos para las pruebas tipo Sydansk 12 horas. 66
Tabla 7. Barrido de frecuencia para selección de valor de prueba. 72
Tabla 8. Resultados de prueba reológica. 74
Tabla 9. Resultados de prueba reológica y cálculos para velocidad de reacción en función de G'. 76
Tabla 10. Resultados obtenidos en pruebas de análisis básicos para los *plugs* analizados. 83
Tabla 11. Resultados obtenidos en pruebas de análisis especiales para los *plugs* analizados. 84
Tabla 12. Saturación de agua irreducible para cada *plug*. 85
Tabla 13. Volúmenes recuperados para cada *plug* durante construcción de línea base. 86
Tabla 14. Volúmenes recuperados para cada *plug* con corrección del perfil de inyección. 87
Tabla 15. Volúmenes recuperados para cada *plug* con corrección del perfil de inyección. 89
Tabla 16. Datos experimentales a modelar numéricamente. 96
Tabla 17. Sensibilidad al orden de reacción de cada componente. 98
Tabla 18. Sensibilidad al factor de frecuencia de reacción. 100

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	Resultados de Análisis Tipo Sydansk Polímeros 1 y 2	113
Anexo B.	Tablas de Resultados Pruebas de Desplazamiento	152

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS GELES POLIMÉRICOS EN PROCESOS DE INYECCIÓN DE AGUA[*]

AUTOR: GUSTAVO ADOLFO MAYA TORO[†]

PALABRAS CLAVE: geles poliméricos, recobro químico, inyección de agua.

Los geles poliméricos como modificadores del perfil de inyección en procesos de recobro secundario son una técnica ampliamente utilizada en la industria, sin embargo, su uso es fundamenta en su éxito comercial, sin existir un conocimiento detallado de sus mecanismos de funcionamiento, y dejando abiertas grandes dudas sobre factores de diseño, variables de riesgo, predicción de los resultados a obtener, etc.

El diseño de las aplicaciones en campo es realizado siguiendo los conceptos formulados desde la creación de la tecnología, involucrando solamente pruebas fluido – fluido con enfoque cualitativo que dejan por fuera una gran cantidad de variables habitualmente consideradas fundamentales en cualquier proceso de recobro de hidrocarburos, tales como la influencia de la roca y las características dinámicas de los procesos.

Esta investigación parte de las pruebas fluido – fluido comúnmente usadas en esta tecnología para posteriormente involucrar análisis cuantitativos como rayos ultravioleta y pruebas reológicas, obteniendo resultados que permiten entender mejor el proceso bajo estudio. Para profundizar en la investigación se realizan también pruebas fluido – roca mediante un diseño de *plugs* en paralelo que permite entender los principios dinámicos de los procesos. Los resultados obtenidos en las etapas anteriores son utilizados en la construcción de un modelo numérico que permite entender los fenómenos involucrados, dando luces en la manera adecuada de entender la tecnología.

[*] Trabajo de monografía.

[†] Director: M.Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑÓZ NAVARRO. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas; Escuela de Ingeniería de Petróleos. Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos.

ABSTRACT

TÍTULO: ANALYSIS OF POLYMERIC GELS WORKING MECHANISMS IN WATER INJECTION PROCESSES[‡]

AUTOR: GUSTAVO ADOLFO MAYA TORO[§]

PALABRAS CLAVE: polymeric gels, chemical enhanced oil recovery, water injection.

Polymeric gels are a widely used technology to improve the injection profile in water injection processes. However, its use is based in their commercial success, without a detailed knowledge of the involved working mechanisms, and leaving considerable doubts on the necessary design factor, risk variables, ways to forecast, etc.

Field applications design is carried out following the concepts developed since the creation of the technology, involving only fluid – fluid test with a qualitative approach that leaves out an important amount of variables, normally considered fundamental in any oil recovery process, such as rock properties influence and the dynamic character of the application.

This research starts with the fluid – fluid tests normally considered in this technology, later, it involves quantitative results of ultraviolet rays and rheological tests, to find results that allow a better understanding of the polymeric gels formation. To go deeper in the research a parallel core floods test is run to understand the dynamic principles of the involved in the processes. The results from previous stages are used to construct a numerical model that allows a better understanding of the phenomena, throwing some light in the way this technology works.

Results from this study allow improving the design process for this type of applications, decreasing the amount of polymer used and optimizing the mixture of polymer and cross linker for the reservoir conditions.

[‡] Graduate work to qualify for the title of Master of Engineering Hydrocarbons.

[§] Director: M.Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑÓZ NAVARRO. Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School.

INTRODUCCIÓN

El recobro mejorado puede entenderse como el conjunto de técnicas que permite llevar el factor de recobro de los yacimientos petrolíferos más allá de los valores alcanzados con sólo inyección de agua y/o gas hidrocarburo (recobro secundario). Dentro de las técnicas de recobro mejorado una de las familias más importantes es la conocida como Recobro Químico, las mismas se han centrado tradicionalmente en los conceptos de control de movilidad y reducción de tensión interfacial. En los últimos años el concepto de Recobro Químico ha evolucionado, debido principalmente a la aparición de técnicas como inyección de geles poliméricos, geles de dispersión coloidal, espumas y, principalmente, mezclas entre ellos.

Una de las técnicas incorporadas al recobro mejorado es el uso de geles poliméricos para corregir perfiles de inyección en procesos secundarios y, en muchos casos, como preparación a procesos de recobro por inyección de polímeros y/o surfactantes. Las primeras aplicaciones de esta tecnología ocurrieron en los años 80's, cuando la Compañía Marathon Oil Company realizó cerca de 30 aplicaciones, obteniendo un costo por barril incremental de 0.34 USD. Desde su primera aplicación, el uso comercial de los geles poliméricos para corrección de perfiles de inyección no se ha detenido, convirtiéndose en práctica común en muchos países.

A pesar de su rápida expansión, en el uso de geles poliméricos para corrección de perfiles de inyección permanecen una gran cantidad de interrogantes. Muchos problemas, de diferentes índoles, y sin explicaciones claras, han sido reportados en repetidas aplicaciones. El tiempo que demora el gel en alcanzar valores de viscosidad que impidan bombearlo permanece sin respuesta clara, por lo que existen reportes tanto de formación de gel en superficie como de aparente no formación del mismo en formación. Pérdida importante de inyectividad, daño de

zonas con saturaciones importantes aun no barridas e incertidumbre en el resultados final de cualquier diseño son por ahora preguntas sin solución en esta tecnología.

La literatura conocida hasta el momento se esfuerza por demostrar en forma práctica las bondades de los geles poliméricos, sin embargo, más allá del análisis cualitativo propuesto por sus creadores, y otros pocos estudios, la materia es aún tema de investigación. Lo anterior explica la falta de conocimiento en el tema.

Este estudio, mediante un enfoque holístico que abarca desde las mismas pruebas cualitativas típicas de la tecnología, pasando por diferentes análisis fluido – fluido, fluido – roca (hasta ahora poco estudiado) y simulación numérica, arroja luces sobre los mecanismos de funcionamiento de la materia de estudio.

Algunos de los hallazgos de esta investigación permitirán en adelante un mejor diseño de las aplicaciones en campo. Tradicionalmente se ha pensado que para producir un gel taponante en yacimiento la concentración de polímero necesaria debe ser lo más alta posible, siendo limitada únicamente por la capacidad de inyección a la formación. Resultados aquí presentados sugieren que una alta concentración de polímero está más relacionada con la duración del mismo que con su formación, caso contrario de la concentración de entrecruzador (*x-linker*), el cual, al ser el reactivo límite de la mezcla, gobierna la formación del gel.

Estudios no tradiciones en geles poliméricos, tales como análisis ultravioleta o pruebas reológicas, muestran que la formación de gel corresponde a una formación de seudo – orden, por lo que corresponde más a una reorganización inter-molecular que a la generación de un nuevo producto, lo cual tiene implicaciones directas en la simulación numérica de estos procesos.

Finalmente, respecto a los mecanismos de funcionamiento de geles poliméricos, esta investigación muestra que aunque complejos, pueden estudiarse de forma tal que mejoren las posibilidades de predecir los resultados de una aplicación en Campo.

1. RECOBRO MEJORADO MEDIANTE INYECCIÓN DE QUÍMICOS

Tal como lo mencionan Green & Willhite[1], las operaciones en la industria del petróleo tradicionalmente se dividieron en primarias, secundarias y terciarias; haciendo referencia al orden en que se ejecutaban durante la vida de un yacimiento. De esta forma, la producción primaria correspondía a la etapa en que el yacimiento podía producir con su propia energía o con la ayuda de sistemas de levantamiento, la producción secundaria consistía en implementar procesos de inyección de agua o gas hidrocarburo del mismo yacimiento y la terciaría implicaba procesos que podían variar desde métodos térmicos como la inyección de vapor hasta métodos de control de movilidad como la inyección de polímeros o de reducción de tensión interfacial como la inyección de surfactantes, pasando por la inyección de gases como CO_2 o nitrógeno.

Con el paso del tiempo, y dada la gran variedad de condiciones operacionales necesarias para el desarrollo de los yacimientos, se hizo evidente que la clasificación mencionada en el párrafo anterior no correspondía a una regla general. Por lo anterior, el concepto de recobro mejorado comenzó a ser utilizado para hacer referencia a los procesos antes denominados terciarios[2].

Este capítulo resume de manera muy general, por no ser el centro del trabajo de investigación, los principales procesos de recobro químico comúnmente aceptados en la literatura y la industria.

1.1 Definición de recobro químico

En la medida que han aparecido nuevos métodos, o se han combinado los métodos existentes, la definición de recobro químico ha variado con el tiempo. En

[1] GREEN, Don & WILLHITE, Paul. Enhanced Oil Recovery. 2 ed. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1998. 1 p. ISBN 1-55563-077-4.
[2] Ibid., p. 1.

el escenario más tradicional Green & Willhite[3] presentan los métodos de recobro químico como aquellos capaces de incrementar el valor del número capilar en el yacimiento, correspondiendo estos con el uso de surfactantes (S) y álcalis / surfactantes (AS), y dando a los polímeros (P) una categoría adicional denominada control de movilidad. En el escenario actual se aceptan como métodos de recobro químico "polímeros, geles para el control de perfil de inyección en profundidad, surfactantes, álcali, emulsiones, espumas y sus combinaciones"[4], sin embargo, es importante tener en cuenta que dada la diversidad de métodos y mecanismos "una definición podría no siempre ser satisfactoria"[5].

Tal como son aceptados en su versión más moderna, Sheng[6], se describen aquí los métodos de polímeros, surfactantes y álcali por ser los más comerciales, además de termodinámicamente estables. Los geles poliméricos, por ser el centro de esta investigación, se tratan en detalle en el próximo capítulo.

1.2 Polímeros (P)

La inyección de polímeros (*polymer flooding*) busca aumentar la viscosidad del agua de inyección de manera que la relación de movilidad entre las fases desplazante (que pasa de ser agua a solución polimérica) y desplazada (aceite) se acerque a la unidad, es decir, buscando que el desplazamiento sea tipo pistón[7]. La ecuación (1) presenta la relación de movilidad para un flujo inmiscible.

$$\mathrm{M} = \frac{\lambda_D}{\lambda_d} = \left(\frac{k_{rD}}{\mu_D}\right)\left(\frac{\mu_d}{k_{rd}}\right) \dots\dots\dots\dots ecuación\ (1)$$

En donde:

[3] Ibid., p. 7.
[4] SHENG, James. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice. 1 ed.: Elsevier, 2011. 4 p. ISBN 978-1-85617-745-0.
[5] Ibid., p. 4.
[6] Ibid., p. 4.
[7] LAKE, Larry. Enhancel Oil Recovery. 1 ed. Austin, Texas: Prentice Hall, 1989. 314 p. ISBN 0-13-281601-6.

M, relación de movilidad.

λ_D, movilidad de la fase desplazante.

λ_d, movilidad de la fase desplazada.

k_{rD}, permeabilidad relativa de la fase desplazante.

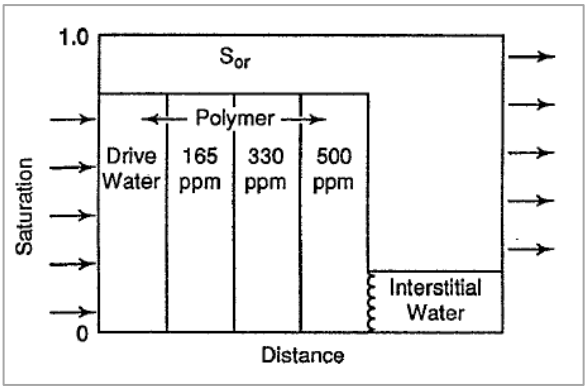
k_{rd}, permeabilidad relativa de la fase desplazada.

μ_D, viscosidad de la fase desplazante.

μ_d, viscosidad de la fase desplazada.

El proceso de un *polymer flood* típicamente consiste en comenzar la inyección de la solución polimérica a la más alta concentración de polímero diseñada, para luego ir disminuyendo la concentración a medida que los volúmenes porosos inyectados aumentan[8], tal como lo muestra la figura 1.

Figura 1. Esquema de inyección tradicional para un *polymer flood.*



Fuente: GREEN, Don & WILLHITE, Paul. Página 101.

Otros autores[9] presentan variaciones sobre el esquema de inyección presentado en la figura 1; agregando al mismo un bache previo y otro posterior a la solución polimérica, cuyo objeto principal es proteger dicha solución de las condiciones del yacimiento, y cuya composición es normalmente agua de baja salinidad.

[8] GREEN. Op. cit., p. 100.
[9] LAKE. Op. cit., p. 316.

La inyección de polímeros es el método de recobro químico más simple y ampliamente extendido. Ha sido utilizado comercialmente desde los años 60's, y han sido reportados factores de recobro incremental entre el 12 y el 30%[10].

Los aspectos prácticos de la inyección de polímeros, entendidos como la aplicación en campo de la tecnología, pueden variar ampliamente entre compañías; sin embargo, existe consenso sobre los pasos mínimos y el orden a seguir para diseñar e implementar un proceso[11], los cuales en términos generales son: estudios de campo (equipos, pruebas de inyectividad), pruebas de laboratorio (compatibilidad, comportamiento de polímeros, desplazamientos) y simulación numérica (2D – 3D.)

1.3 Surfactantes (S)

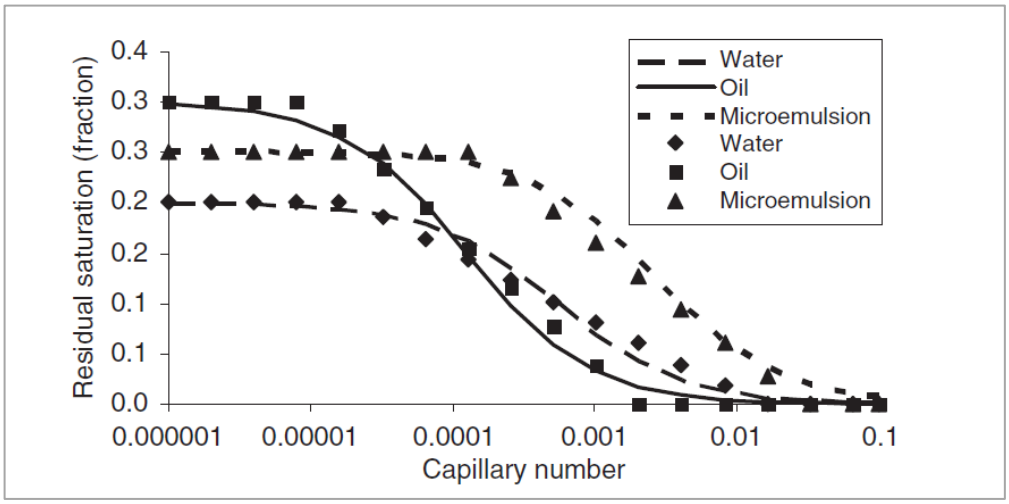
De acuerdo con Sheng[12], la inyección de surfactantes (*surfactant flooding*) es un método que puede considerarse como fundamental en el recobro químico, en el cual el mecanismo de funcionamiento clave es la reducción de la tensión interfacial entre el aceite y el fluido desplazante. La figura 2 presenta este efecto como relación entre el número capilar (inverso proporcional a la tensión interfacial) y la saturación de aceite irreducible.

La teoría detrás de la inyección de surfactantes ha evolucionado hacia una gran cantidad de temas cuya complejidad hace que el diseño adecuado para cada campo requiera un estudio profundo. El primer planteamiento de un proceso de surfactantes fue dado por Atkinson en 1927[13], quien propuso que la tensión superficial entre la roca yacimiento y el crudo podía ser reducida usando

[10] POPE, Gary. Recent Developments and Remaining Challenges of Enhanced Oil Recovery. En: Journal of Petroleum Technology. Julio, 2011.
[11] SORBIE, K. Polymer-Improved Oil Recovery. 1 ed. London, U.K.: Blackie & Son Ltd, 1991. 359 p. ISBN 0-8493-7137-6.
[12] SHENG. Op. cit., p. 4.
[13] UNITED STATES PATENT OFFICE. Recovery of Petroleum from Oil-Bearing Sands. Inventor: H. ATKINSON. Fecha de solicitud: 14, abril, 1926. US PATENT 1,651,311. 29, noviembre, 1927.

soluciones jabonosas. La evolución de patentes en el tema puede seguirse con más de 50 de ellas hasta 2008[14].

Figura 2. Mecanismo de un *surfactant flood*.



Fuente: SHENG, James. Página 312.

El tipo de surfactante necesario para cada aplicación, entendido este como la mezcla de surfactantes activos, normalmente corresponde a componentes orgánicos compuestos por una cadena ("cola") de hidrocarburos y un grupo polar ("cabeza"). Los surfactantes pueden ser clasificados de acuerdo a su naturaleza iónica como: aniónicos, catiónicos, no-iónicos y zwiteriónico. A pesar de que los surfactantes aniónicos son los más comúnmente aplicados debido a su poca adsorción, los no-iónicos son importantes para mejorar el comportamiento de fases de la mezcla de agentes activos, y los catiónicos pueden ser utilizados en carbonatos[15].

[14] JAMALOEI, Benyamin. Insight into the Chemistry of Surfactant-Based Enhanced Oil Recovery Processes. En: Recent Patents on Chemical Engineering. 2009. vol. 2, no. 1, p. 1–10.
[15] SHENG. Op. cit., p. 241.

1.4 Álcali (A)

De acuerdo con Sheng[16], la inyección de álcali (*alcaline flooding*), también llamada inyección caustica (*caustic flooding*), se basa en una reacción química existente entre agentes alcalinos y los ácidos orgánicos muchas veces presentes en el crudo, produciendo surfactantes que pueden reducir la tensión interfacial. En las primeras aplicaciones con álcali se utilizaba hidróxido de sodio o carbonato de sodio, sin embargo, debido a problemas de formación de emulsiones y escamas, la tendencia es no utilizar hidróxido de sodio.

En la práctica de los procesos alcalinos es común denominar como ácidos del petróleo a aquellos compuestos del crudo que reaccionan con el álcali formando surfactantes, sin embargo, la estructura de dichos compuestos no está claramente establecida[17].

Un hecho de importancia mayor es que el mecanismo predominante en inyección de álcali no ha sido determinado claramente. En 1976, Johnson[18] resumió varios mecanismos por los cuales la inyección caustica puede funcionar; la emulsificación y la reducción de la tensión interfacial, así como la coalescencia y los cambio de humectabilidad, son algunos de los fenómenos que juegan un papel protagónico.

Ehrlich & Wygal[19] recomendaron que para que el mecanismo de emulsificación sea efectivo el número ácido del crudo debe ser mínimo de 0.5 mg KOH por gramo de aceite. Chang et al[20] sugieren que en la práctica el número ácido debe

[16] Ibid., p. 389.
[17] GREEN. Op. cit., p. 287.
[18] JOHNSON, J. Status of Caustic and Emulsion Methods. En: Journal of Petroleum Technology. Enero, 1976. p. 85-92.
[19] EHRLICH, R & WYGAL, R. Interaction of Crude Oil and Rock Properties with the Recovery of Oil by Caustic Waterflooding. En: Society of Petroleum Engineers Journal. Agosto, 1977. p. 263-279.
[20] CHANG, H, *et al*. Advances in Polymer Flooding and Alkaline/Surfactant/Polymer Processes as Developed and Applied in the People´s Republic of China. En: Journal of Petroleum Technology. Febrero, 2006. p. 84-89.

der mayor de 0.3 mg HOH por gramo de aceite. Sin embargo, al día de hoy el mecanismo de emulsificación en inyección acústica no es universalmente aceptado, tal como es discutido por Sheng[21].

1.5 Métodos combinados de recobro químico

En la actualidad, con excepción de los procesos de *polymer flooding*, la práctica común en el diseño e implementación de procesos de recobro químico es la combinación de las tecnologías mencionadas en los puntos anteriores. La combinación de álcali, surfactante y polímero; tratando de aprovechar las bondades de cada uno de ellos, es sin duda la mejor oportunidad al momento de considerar la economía de un proyecto.

Al analizar un escenario de desarrollo con polímero, común en procesos jóvenes de inyección de agua, es inevitable pensar en los beneficios que pueden obtenerse si se considera la posibilidad de, en un mismo desplazamiento, barrer parte de la saturación de aceite irreducible, por lo que es factible considerar un proceso surfactante – polímero en dichos casos. Así mismo, en procesos de inyección de agua avanzados, en donde la consideración habitual es el uso de surfactantes; si las características del crudo lo permiten, es lógico considerar el álcali con el objeto de reducir la cantidad de surfactante necesario.

Finalmente, es importante recordar que reducir la tensión interfacial desfavorece la relación de movilidad de un barrido con agua, por lo que el uso complementario del polímero junto con los surfactantes y los álcalis siempre será una necesidad.

[21] SHENG. Op. cit., p. 400.

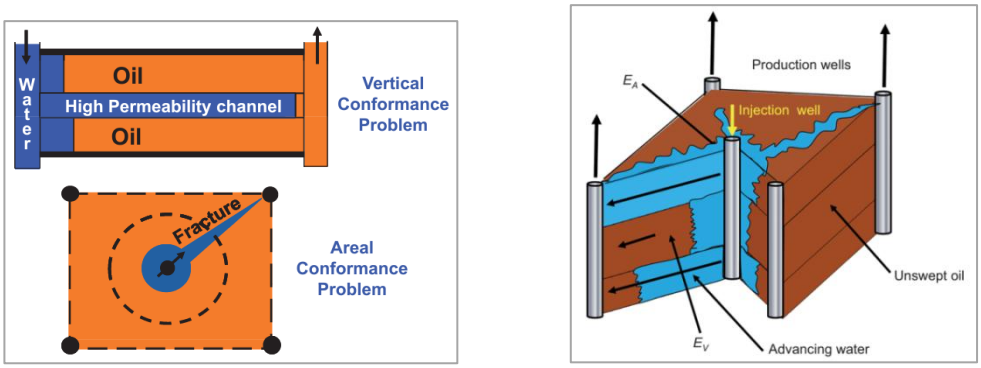
2. CONFORMANCE

2.1 Definición

De acuerdo con Zydansk & Romero-Zerón[26], el *conformance* es definido como la medida de la eficiencia de barrido volumétrica durante un proceso de recobro. El término se refiere también, en algunas ocasiones, a la medición y el tratamiento de la producción excesiva de agua en yacimientos de hidrocarburos.

La figura 3 presenta ejemplos de problemas de *conformance*, tanto verticales como horizontales.

Figura 3. Algunos problemas de *conformance*.



Fuente: SYDANSK, Robert & ROMERO-ZERÓN, Laura. Páginas 5 y 6.

Según Sydansk & Romero-Zerón[27], para dar solución a los problemas de *conformance* la industria ha planteado todo tipo de aproximaciones, entre ellas: uso de cementos, *polymer flooding*, tratamientos reductores de permeabilidad (geles, resinas, modificadores de permeabilidad relativa), espumas, partículas sólidas, métodos mecánicos en pozo, métodos de completamiento y perforación, ubicación de pozos, reducción de espaciamiento, abandono y cierre selectivo de pozos, balanceo de patrones, descripción detallada del yacimiento, etc.

[26] SYDANSK, Robert & ROMERO-ZERÓN, Laura. Reservoir Conformance Improvement. 1 ed. Richardson, Texas.: Society of Petroleum Engineers, 2011. 3 p. ISBN 978-1-55563-302-8.
[27] Ibid., p. 50.

Los mismos autores[28] mencionados anteriormente destacan que los geles, y en particular los geles poliméricos, se han convertido en la tecnología de *conformance* más ampliamente aplicada. Ahora bien, es importante insistir en que, como se mencionó en el capítulo anterior, los tratamientos con geles al interior de las formaciones encajan claramente dentro de la definición actual de recobro químico.

2.2 Sistemas coloidales

El nombre geles es utilizado al interior de la ciencia de los coloides, la cual es importante revisar de manera tangencial con el objeto de definir claramente los conceptos necesarios. De acuerdo con Hiemenz & Rajagopalan[29], un coloide es cualquier partícula con alguna dimensión lineal entre 10^{-9} m y 10^{-6} m. Este intervalo se genera debido a la relación entre la partícula coloidal y el medio que la contiene. En general, se usan las expresiones fase dispersa y fase continua para referirse a las partículas y al medio que las contiene respectivamente. Otros autores definen coloide en función del peso de las partículas o el número de átomos en ellas.

La ciencia de los coloides es en muchos aspectos interdisciplinaria, en ella importa el tamaño de las partículas, más que la composición química o el estado físico.

"Los coloides son también clasificados con base en la afinidad de las superficies de las partículas con la fase continua"[30], lo anterior genera los conceptos de coloides liofílicos y liofóbicos, los cuales literalmente hacen referencia a afinidad o no afinidad con el solvente.

[28] Ibid., p. 68-71.
[29] HIEMENZ, Paul & RAJAGOPALAN, Raj. Principles of Colloid and Surface Chemistry. 3 ed. New York: Marcel Dekker, 1997. p. 1. ISBN 0-8247-9397-8.
[30] Ibid., p. 10.

La figura 4 presenta un resumen de algunos nombres usados para designar sistemas coloidales.

Figura 4. Nombres usados para designar algunos sistemas coloidales.

Fase Continua	Fase Dispersa	Nombre descriptivo
Gas	Líquido	Niebla, bruma, aerosol
Gas	Sólido	Humo, aerosol
Líquido	Gas	Espuma
Líquido	Líquido	Emulsión
Líquido	Sólido	Sol, solución coloidal, gel, suspensión
Sólido	Gas	Espuma sólida
Sólido	Líquido	Gel, emulsión sólida
Sólido	Sólido	Aleación

Fuente: HIEMENZ, Paul & RAJAGOPALAN, Raj. Página 10.

Las soluciones poliméricas, las cuales sumadas a un entre - cruzador (*x-linker*) son la principal forma de *conformance* químico, son inicialmente una fase sólida dispersa en una continua líquida, pasando posteriormente por diferentes estadios que, de acuerdo con la figura 4, las mantienen dentro de la ciencia de los coloides.

2.3 Soluciones poliméricas (HPAM) para *conformance*

La tecnología de geles poliméricos en la industria de los hidrocarburos tuvo sus inicios en los años 60. En 1968 Donald C. Goetz[31] obtuvo la patente US 3,383,307; en la cual explica la formación de geles poliméricos y plantea su uso tanto para remplazar el agua en un proceso de desplazamiento (*polymer flood*), como para bloqueos temporales (*conformance* químico). En 1973 le fue otorgada a James W. Gall[32] la patente 3,762,476; concerniente a la corrección subterránea de permeabilidad, concentrándose en la ubicación de geles poliméricos en las formaciones productores, siendo la primera alusión indirecta al *conformance*

[31] UNITED STATES PATENT OFFICE. Geling Agents, Gels and Methods for Forming Gels. Inventor: D. GOETZ. CL.: 252-316. Fecha de solicitud: 30, julio, 1964. US PATENT 3,383,307. 14, mayo, 1968.
[32] UNITED STATES PATENT OFFICE. Subterranean Formation Permeability Correction. Inventor: J. GALL. Int. CL.: E21b 33/138, E21b 43/22. Fecha de solicitud: 3, enero, 1972. US PATENT 3,762,476. 2, octubre, 1973.

químico. El mencionado documento plantea por primera vez la posibilidad de corregir la permeabilidad de una formación por medio de la obtención de un gel formado mediante la unión de un polímero con un ion metálico, denominado *x-linker*. La invención asignada a Gall detallaba la necesidad de inyectar a la formación un primer bache de solución de agua con polímero a una concentración específica de este último, acto seguido se inyectaba el ion metálico, esperando que ambos reaccionaran en la formación para obtener el gel. Las aplicaciones en campo de la invención de Gall, sin embargo, no arrojaron resultados positivos sobre la disminución en la producción de agua asociada a la producción de aceite[33].

En 1987 una nueva patente fue otorgada en Estados Unidos para la aplicación de geles poliméricos en yacimientos de hidrocarburos a R. Sydansk y P. Argabright[34]. En este nuevo caso la tecnología de geles poliméricos no sufre cambios en sus conceptos químicos, pero si lo hace en la manera de obtener el gel. Esta vez el polímero y el *x-linker* son mezclados desde superficie, siendo entonces inyectado a la formación un único bache de solución (agua + polímero + *x-linker*) a la cual se le dará un tiempo de reposo para esperar la formación del gel polimérico.

La técnica desarrollada por Sydansk & Argabright, mostró su eficiencia al ser utilizada en 29 tratamientos en el Estado Wyoming en Estados Unidos[35]. El mayor beneficio se obtuvo cuando los geles poliméricos fueron utilizados en pozos inyectores, de forma que la producción de agua asociada a la producción de petróleo en los pozos productores influenciados por el proceso disminuyó considerablemente. En total los 29 tratamientos produjeron 3.7 millones de barriles adicionales a un costo promedio por barril incremental de 0.34 USD.

[33] UNITED STATES PATENT OFFICE. Conformance Improvement in a Subterranean Hydrocarbon-Bearing Formation Using Polymer Gel. Inventor: R. SYDANSK and P. ARGABRIGHT. Int. CL.: E21b 33/138. Fecha de solicitud: 27, enero, 1986. US PATENT 4,683,949. 4, agosto, 1987.
[34] Ibid., p. 1.
[35] SYDANSK, Robert. & MOORE P. Production Responses in Wyoming's Big Horn Basin Resulting From Application of Acrylamide-Polymer/Cr(III)-Carboxilate Gels. Paper SPE 21894. 1990.

Fruto de los resultados descritos en el párrafo anterior, la tecnología de geles poliméricos se convirtió en una opción importante para tratar procesos de inyección de agua con características de flujo preferencial de la misma. Numerosas aplicaciones han sido llevadas a cabo desde entonces, mostrando resultados promedio positivos[36,37].

A pesar de su aplicación comercial debido a las numerosas aplicaciones exitosas, desde la patente otorgada a Sydansk los mecanismos de funcionamiento de la tecnología de geles poliméricos para aplicación en yacimientos de hidrocarburos no han sido explicados a profundidad. No existen publicaciones que aborden los fenómenos de interacción fluido (gel) – roca, en sus aspectos estáticos o dinámicos, y las características mismas de la reacción química involucrada no están claras para el amplio rango de variación de las propiedades de los yacimientos.

Diferentes estudios han abordado el tema particular de la formación de gel polimérico, incluso desde antes del éxito comercial de la tecnología. En 1981, Ronald E. Terry, et al[38], correlacionaron el tiempo de formación del gel utilizando diferentes iones metálicos, para lo cual utilizaron medidas reológicas. En 1994, Thomas P. Lockhart[39], estudió los posibles mecanismos de unión entre poliacrilamida y Cr^{+3} mediante métodos de química analítica. En 1994, Klaveness & Ruoff[40,] presentaron también un estudio sobre los posibles mecanismos de entre cruzamiento entre poliacrilamida y Cr^{+3}, centrándose en la velocidad de la reacción

[36] WOUTERLOOD, Carlos; FALCIGNO, Esteban Y NORMAN, Chuck. Metodología y Resultados de Proyectos de Inyección de Geles para Incrementar la Recuperación en un Reservorio Heterogéneo y Multicapa de la Cuenca Neuquina de Argentina. INGEPET. 2002.

[37] NORMAN, Chuck, *et al*. A Review of Over 100 Polymer Gel Injection Well Conformance Treatments in Argentina and Venezuela: Design, Field Implementation and Evaluation. Paper SPE 101781. 2006.

[38] TERRY, Ronald, *et al*. Correlation of Gelation Times for Polymer Solutions Used as Sweep Improvement Agents. Paper SPE 8419. 1981.

[39] LOCKHART, Thomas. Chemical Properties of Chromium/Polyacrilamide Gels. Paper SPE 20998. 1994.

[40] KLAVENESS, Thore & Ruoff, Peter. Kinetics of the Cross-linking of Polyacrylamide with Cr(III). Analysis of Possible Mechanisms. En: Journal of Physical Chemistry. Junio, 1994. vol. 98, no. 40, p. 10119–10123.

y utilizando para ello mediciones de rayos ultravioleta. En 1995, Klaveness, Ruoff & Kolnes[41], profundizaron en el estudio anterior, incorporando esta vez mediciones reológicas.

A pesar de todo lo anterior, ningún estudio ha sido concluyente respecto a la formación misma del gel, su estructura o características similares que puedan proporcionar un mejor entendimiento del funcionamiento de la tecnología; quedando la componente roca y las condiciones dinámicas del yacimiento por fuera de todos los estudios.

En 2010, Ibarra[42] y Delgadillo[43]., en estudios independientes que buscaban determinar la factibilidad técnica de la evaluación de geles, el primero de ellos mediante simulación numérica, y el segundo incorporando ensayos de laboratorio; determinaron la necesidad de profundizar en el tema. Ambos estudios concluyeron que es necesario llevar a cabo mayor investigación en los efectos del gel sobre la roca y la simulación numérica del proceso.

En 2011, La Sociedad de Ingenieros de Petróleos Americana publicó un libro titulado *Reservoir Conformance Improvement*[44,] el cual posee un enfoque más práctico que teórico sobre el tema, y considera los geles poliméricos como una opción viable dentro de un marco general de técnicas / tecnologías que pueden utilizarse para atacar problemas de *conformance*, sin embargo, no profundiza dentro de los conceptos que permanecen como interrogantes de la tecnología.

[41] KLAVENESS, Thore; Ruoff, Peter & Kolnes, Jostein. Kinetics of the Cross-linking of Polyacrylamide with Cr(III). Rheological Measurements of the Gelation. En: Journal of Physical Chemistry. Enero, 1995. vol. 99, no. 20, p. 8255 – 8259.

[42] IBARRA, Javier. Evaluación de la implementación de geles mediante simulación numérica. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2010.

[43] DELGADILLO, Cluadia. Evaluación de la viabilidad técnica de implementación de procesos de inyección de geles. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2010.

[44] SYDANSK. Op. cit., p. 1.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ESTRATEGIA DE ANÁLISIS

A pesar de haberse convertido en una tecnología comercial desde los 80´s, tal como se presenta en el capítulo anterior, al día de hoy el *conformance* con geles poliméricos en pozos inyectores es aplicado sin poseer certeza sobre temas tan fundamentales como la cinética de la reacción, por lo que a su vez es imposible modelar acertadamente el proceso. El éxito de la tecnología se basa en buena medida en la experiencia de los operadores para evitar problemas como formación de gel en superficie o no generación del mismo en el yacimiento.

Los protocolos de laboratorio que actualmente se aplican consideran un enfoque fluido – fluido que busca verificar la formación y durabilidad del gel a condiciones de yacimiento, sin indagar en los detalles de la reacción involucrada o en las condiciones operacionales. Dichos protocolos no incluyen fase roca – fluido, por lo que es imposible tener idea previa de la efectividad del tratamiento, además, deja sin respuesta una gran cantidad de dudas tales como la distribución de la penetración del gel a lo largo de un intervalo abierto a la inyección.

La realización de tratamientos de *conformance* con geles poliméricos en pozos inyectores, sin un conocimiento detallado de la tecnología, hace que los riesgos sean importantes, abriendo la posibilidad de pérdida de pozos, de pérdida de capacidad de inyección o en general de detrimento económico para la Compañía operadora.

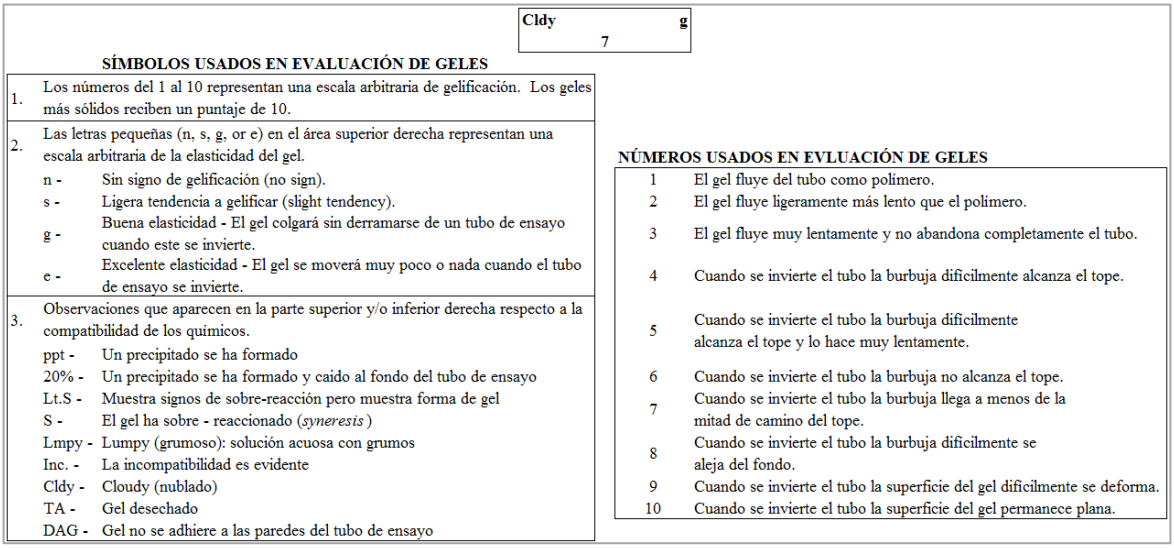
3.1 Pruebas experimentales

El llamado código de Sydansk[45], además de algunas pruebas tomadas de la práctica recomendada API RP 63 para evaluación de polímeros usados en

[45] SYDANSK. Op. Cit., p. 1.

operaciones recobro mejorado[46], suman el total de pruebas experimentales previas a un tratamiento con geles poliméricos. Considerando que el trabajo presentado por Sydansk corresponde a una escala cualitativa, la cual se presenta en la figura 5, y que la práctica API RP 63 está diseñada "principalmente para comparación cualitativa de desempeño y selección general de polímeros solubles en agua"[47], es claro el vacío existente en el entendimiento de los fenómenos involucrados.

Figura 5. Código de Sydansk.



Cldy g
7

SÍMBOLOS USADOS EN EVALUACIÓN DE GELES

1. Los números del 1 al 10 representan una escala arbitraria de gelificación. Los geles más sólidos reciben un puntaje de 10.
2. Las letras pequeñas (n, s, g, or e) en el área superior derecha representan una escala arbitraria de la elasticidad del gel.
   - n - Sin signo de gelificación (no sign).
   - s - Ligera tendencia a gelificar (slight tendency).
   - g - Buena elasticidad - El gel colgará sin derramarse de un tubo de ensayo cuando este se invierte.
   - e - Excelente elasticidad - El gel se moverá muy poco o nada cuando el tubo de ensayo se invierte.
3. Observaciones que aparecen en la parte superior y/o inferior derecha respecto a la compatibilidad de los químicos.
   - ppt - Un precipitado se ha formado
   - 20% - Un precipitado se ha formado y caido al fondo del tubo de ensayo
   - Lt.S - Muestra signos de sobre-reacción pero muestra forma de gel
   - S - El gel ha sobre - reaccionado (*syneresis*)
   - Lmpy - Lumpy (grumoso): solución acuosa con grumos
   - Inc. - La incompatibilidad es evidente
   - Cldy - Cloudy (nublado)
   - TA - Gel desechado
   - DAG - Gel no se adhiere a las paredes del tubo de ensayo

NÚMEROS USADOS EN EVLUACIÓN DE GELES

1	El gel fluye del tubo como polímero.
2	El gel fluye ligeramente más lento que el polímero.
3	El gel fluye muy lentamente y no abandona completamente el tubo.
4	Cuando se invierte el tubo la burbuja dificilmente alcanza el tope.
5	Cuando se invierte el tubo la burbuja dificilmente alcanza el tope y lo hace muy lentamente.
6	Cuando se invierte el tubo la burbuja no alcanza el tope.
7	Cuando se invierte el tubo la burbuja llega a menos de la mitad de camino del tope.
8	Cuando se invierte el tubo la burbuja dificilmente se aleja del fondo.
9	Cuando se invierte el tubo la superficie del gel dificilmente se deforma.
10	Cuando se invierte el tubo la superficie del gel permanece plana.

Fuente: TIORCO INC (comunicación personal).

El enfoque experimental aquí planteado contempla los siguientes pasos:

[46] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations. RP 63. 1 Ed. Washington, USA. 1990. 86 p.
[47] Ibid., p. 1.

3.1.1 Pruebas tipo Sydansk. Utilizando dos poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas (HPAM) de diferentes pesos moleculares se realizan pruebas tradicionales de código de Sydansk, con el objeto de identificar aquellas formulaciones que forman un gel rígido. La figura 6 detalla el diseño experimental para este caso.

Figura 6. Diseño experimental inicial.

	Factores	5					
	Polymer	[Polymer]	[x-linker]	Salinidad [NaCl]	T[°C]		Variables Respuesta
	1	4000	20 to 1	4000	22 (72.6°f)		Tiempo de gelificación
	2	6000	40 to 1	8000	52 (125.6°f)		Consistencia del gel (τ)
		8000	80 to 1	16000	67 (152.6°f)		
					75 (167.06°f)		
Niveles	2	3	3	3	4	216	

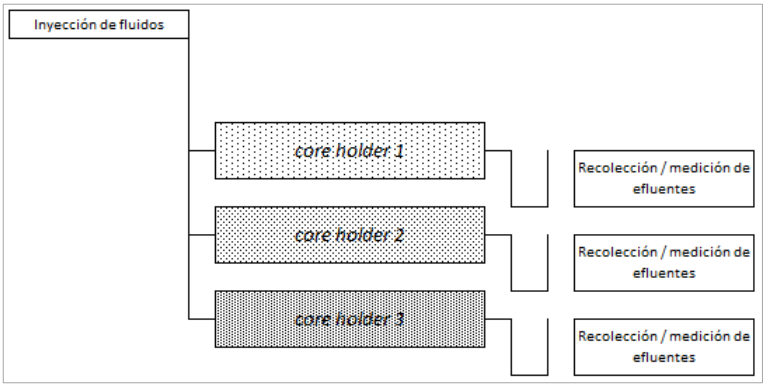
Fuente: El autor.

Al considerar cinco (5) variables controlables, cada una de ellas con niveles seleccionados dentro de los rangos utilizados en la actividad comercial, el resultado es un mínimo de 216 formulaciones que se observan durante un mes para determinar cuáles de ellas forman un gel adecuado.

3.1.2 Pruebas tipo Sydansk cortas, ultravioleta (UV) y reología. Tomando los resultados de las pruebas del paso anterior se agregan tres (3) variables controlables para estudiar el efecto de las concentraciones de diferentes iones comunes en el agua de preparación de geles rígidos, con esto, el nuevo diseño experimental se analiza nuevamente bajo el código de Sydansk, esta vez agregando a la simple observación análisis con rayos ultravioleta y de reología (*G*' y *G*'') que permitan caracterizar la reacción. Se pretende también aquí modificar el tiempo de observación en las pruebas tipo Sydansk, de manera que se reduzca a valores más aceptables para necesidades comerciales (días).

3.1.3 Pruebas de desplazamiento en paralelo. Una de las formulaciones hasta el momento analizadas se selecciona para iniciar pruebas fluido – roca. Esta etapa consta de desplazamientos en núcleos reales de formación, previamente caracterizados (análisis básicos y especiales), con contrastes de permeabilidad que permitan representar estratos con diferentes capacidades de flujo. Estos núcleos serán ubicados en paralelo, tal como se ilustra en la figura 7.

Figura 7. Esquema de equipo con *core holder* en paralelo para estudio fluido - roca.



Fuente: El autor.

Debido al costo de los recursos, y al carácter exploratorio de esta investigación[48], se realiza sólo una (1) prueba de desplazamiento, con la cual se busca identificar las tendencias que gobiernan los fenómenos involucrados.

La prueba se inicia con los núcleos restaurados a condiciones de saturación de agua irreducible (S_{wir}), procediendo a realizar una inyección de agua común para los tres núcleos (*core holders*) hasta un corte de agua total, sumando todos los efluentes, de 98%, obteniendo así una línea base y un perfil de inyección. El sistema es llevado nuevamente a S_{wir} iniciando de nuevo el proceso de inyección de agua. Cuando se presente la ruptura de agua en el primer *core holder* se

[48] HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA, María del Pilar. 5 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2010. 613 p. ISBN 978-607-15-0291-9.

procede a inyectar en todo el sistema el gel polimérico seleccionado en las pruebas fluido - fluido, tal como se realiza en aplicaciones en campo, reanudando la inyección de agua nuevamente hasta un corte total de esta del 98%, resultando en este punto el perfil de inyección modificado por el gel polimérico. Los resultados volumétricos de ambas etapas se comparan para determinar el beneficio de la inyección del gel en función del recobro total del sistema.

3.2 Modelamiento numérico

El software comercial CMG (*Computer Modeling Group*) es actualmente la herramienta de mayor uso para el modelamiento de procesos de recobro mejorado. En particular, este software permite incorporar reacciones químicas a cualquier fase fluyente considerada. Debido a esta característica se utiliza aquí CMG para ajustar las pruebas de desplazamiento realizadas, incorporando en dicho ajuste las características de la reacción deducidas en la etapa fluido - fluido. Lo anterior permite inferir si dichas características son adecuadas para el modelamiento de este tipo de procesos, arrojando luces sobre los mecanismos de funcionamiento de los geles taponantes.

4. PRUEBAS CONVENCIONALES PARA GELES POLIMÉRICOS (SYDANSK)

Partiendo del diseño presentado en el capítulo anterior, se detallan aquí los resultados obtenidos de las pruebas tipo Sydansk llevadas a cabo. Los resultados son analizados en función tanto de la literatura conocida como de los resultados de esta tecnología a nivel comercial.

4.1 Polímeros y caracterización de polímeros (control de calidad)

Para dar representatividad al diseño experimental planteado se solicitó a casas comerciales polímeros del tipo normalmente utilizado en procesos comerciales de geles rígidos, es decir, poliacrilamidas con un porcentaje de hidrólisis entre el 20 y el 30. Dado que el peso molecular es un factor que puede influenciar el desempeño de los polímeros bajo estudio, se solicitó que este se encontrara entre valores promedio de entre 8 – 20 M Dalton.

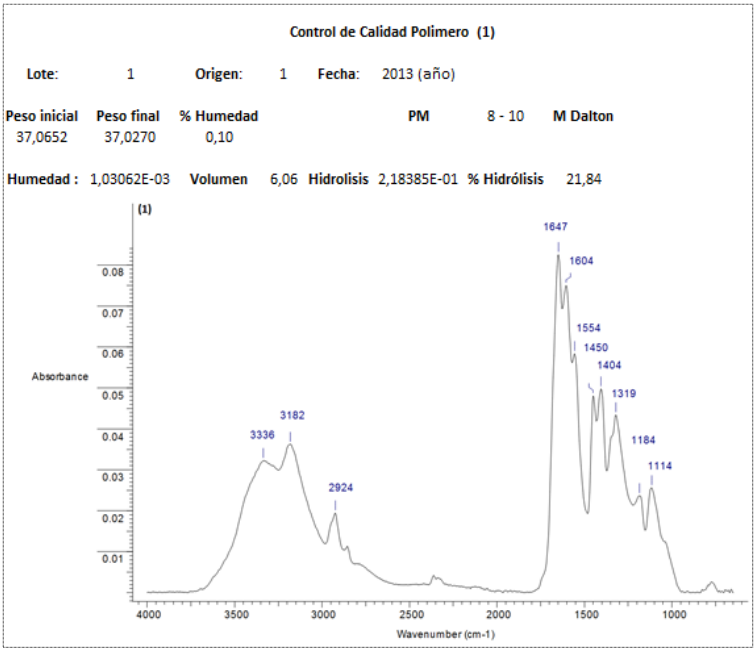
Inicialmente se recibieron 10 polímeros, para los cuales se realizaron pruebas de verificación de las propiedades mencionadas en el párrafo anterior. Resultado de estas pruebas se seleccionaron dos polímeros, referenciados en adelante como P1 y P2, para desarrollar el diseño experimental.

Las figuras 8 y 9 detallan los resultados de las pruebas de verificación realizadas sobre los polímeros recibidos.

Se observa en estas figuras que ambos polímeros se ajustan a las condiciones solicitadas. Los porcentajes de hidrólisis se encuentran entre 21 y 23%, y los pesos moleculares entre 8 y 16 Dalton. El análisis con espectro infrarrojo comprueba que las muestras consideradas corresponden a poliacrilamidas, la

cual, como lo menciona Sorbie[49], es la molécula de polímero más común en procesos de recobro mejorado.

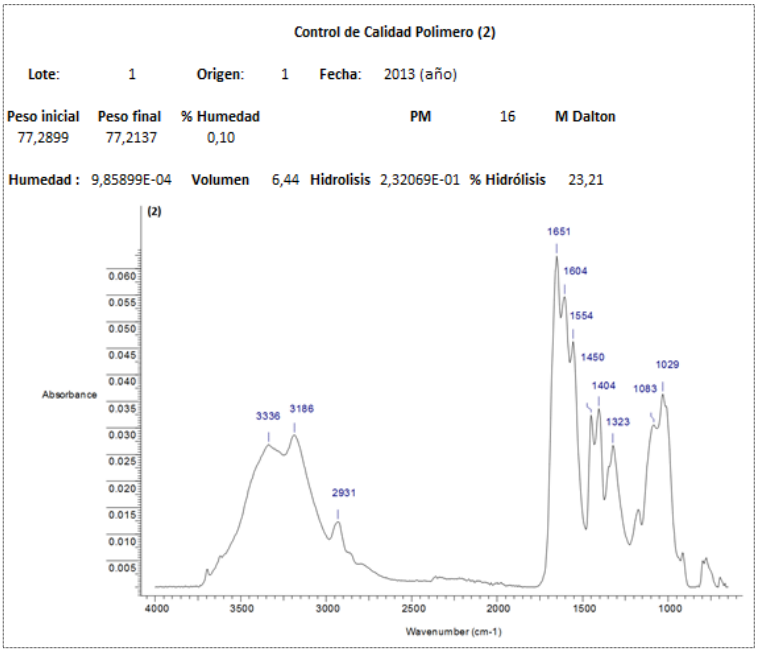
Figura 8. Control de calidad polímero 1.



Fuente: El autor.

[49] SORBIE. Op. cit., p. 4.

Figura 9. Control de calidad polímero 2.



Fuente: El autor.

4.2 Resultados de los análisis

La ejecución del diseño experimental propuesto en el capítulo 3 inició con la preparación de las 216 formulaciones necesarias, asignando a cada una de ellas un código para facilitar su seguimiento. Las mismas fueron observadas durante un mes, tal como lo plantea Sydansk en su estudio original, registrando la consistencia del gel (τ) de acuerdo con la escala cualitativa presentada y obteniendo los resultados expuestos en las tablas 1 a 3 para P1. Los resultados obtenidos para P2 se detallan en el Anexo A. En adelante todos los análisis aquí presentados corresponden a P1.

Tabla 1. Resultados de análisis tipo Sydansk a 4.000 PPM.

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
4000	20:1	4000	22 (72°f)	1^{n}	7^{g}	2^{g}	$_{Lt.S}1^{n}$	Lt.S – Inc	1aaa072
4000	20:1	4000	52 (126°f)	8^{e}	$_{Cldy}9^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	1aaa126
4000	20:1	4000	67 (153°f)	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	1aaa153
4000	20:1	4000	75 (167°f)	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	1aaa167
4000	20:1	8000	22 (72°f)	1^{n}	7^{g}	8^{g}	8^{g}	Lt.S	1aab072
4000	20:1	8000	52 (126°f)	8^{e}	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	1aab126
4000	20:1	8000	67 (153°f)	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	1aab153
4000	20:1	8000	75 (167°f)	$_{Cldy}9^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	S	1aab167
4000	20:1	16000	22 (72°f)	1^{n}	7^{g}	8^{e}	$_{Inc}8^{g}$	10^{e}	1aac072
4000	20:1	16000	52 (126°f)	$_{Cldy}9^{e}$	$_{Cldy}9^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}9^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	1aac126
4000	20:1	16000	67 (153°f)	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	1aac153
4000	20:1	16000	75 (167°f)	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	S	S	S	1aac167
4000	40:1	4000	22 (72°f)	1^{n}	6^{s}	7^{g}	7^{e}	7^{e}	1aba072
4000	40:1	4000	52 (126°f)	7^{g}	8^{e}	5^{g}	1^{s}	2^{s}	1aba126
4000	40:1	4000	67 (153°f)	$_{Cldy}7^{g}$	5^{g}	2^{g}	2^{g}	2^{s}	1aba153
4000	40:1	4000	75 (167°f)	8^{e}	5^{g}	3^{g}	2^{g}	2^{g}	1aba167
4000	40:1	8000	22 (72°f)	1^{n}	6^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	1abb072
4000	40:1	8000	52 (126°f)	7^{g}	8^{g}	8^{g}	$_{Inc}2^{s}$	2^{s}	1abb126
4000	40:1	8000	67 (153°f)	6^{g}	5^{g}	2^{s}	2^{g}	1^{s}	1abb153
4000	40:1	8000	75 (167°f)	7^{g}	5^{g}	7^{g}	2^{s}	2^{s}	1abb167
4000	40:1	16000	22 (72°f)	1^{n}	7^{g}	7^{g}	$_{Inc}8^{g}$	8^{g}	1abc072
4000	40:1	16000	52 (126°f)	$_{Cldy}8^{g}$	8^{g}	1^{s+}	2^{s}	Lt.S	1abc126
4000	40:1	16000	67 (153°f)	$_{Cldy}8^{g}$	8^{g}	2^{s}	Lt.S	Lt.S	1abc153
4000	40:1	16000	75 (167°f)	$_{Cldy}8^{g}$	8^{g}	2^{s}	2^{s}	2^{s}	1abc167
4000	80:1	4000	22 (72°f)	1^{n}	2^{s}	2^{s}	5^{g}	6^{g}	1aca072
4000	80:1	4000	52	6^{g}	6^{g}	5^{g}	5^{g}	2^{g}	1aca126

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
			(126°f)						
4000	80:1	4000	67 (153°f)	6^{s}	6^{g}	6^{e}	7^{g}	7^{g}	1aca153
4000	80:1	4000	75 (167°f)	2^{s}	5^{e}	5^{g}	6^{g}	2^{s}	1aca167
4000	80:1	8000	22 (72°f)	1^{n}	5^{s}	5^{s}	7^{g}	6^{g}	1acb072
4000	80:1	8000	52 (126°f)	7^{g}	7^{g}	7^{g}	$_{Inc}2^{g}$	7^{g}	1acb126
4000	80:1	8000	67 (153°f)	6^{s}	6^{e}	6^{g}	2^{g}	Lt.S	1acb153
4000	80:1	8000	75 (167°f)	7^{s}	6^{g}	2^{s}	6^{e}	6^{e}	1acb167
4000	80:1	16000	22 (72°f)	1^{n}	5^{s}	2^{g}	$_{Inc}2^{g}$	2^{g}	1acc072
4000	80:1	16000	52 (126°f)	7^{s}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	6^{g}	1acc126
4000	80:1	16000	67 (153°f)	7^{s}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	1acc153
4000	80:1	16000	75 (167°f)	6^{s}	7^{s}	7^{g}	6^{g}	4^{s}	1acc167

Fuente: El autor.

Tabla 2. Resultados de análisis tipo Sydansk a 6.000 PPM.

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
6000	20:1	4000	22 (72°f)	2^{n}	8^{g}	9^{e}	10^{e}	9^{e}	1baa072
6000	20:1	4000	52 (126°f)	9^{e}	10^{e}	Inc	$_{Lt.S}1^{s}$	Lt.S	1baa126
6000	20:1	4000	67 (153°f)	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Lt.S}1^{n}$	Lt.S	S	1baa153
6000	20:1	4000	75 (167°f)	$_{Cldy}10^{e}$	Inc.	Lt.S	Lt.S	Lt.S	1baa167
6000	20:1	8000	22 (72°f)	2^{s}	9^{e}	9^{e}	8^{e}	9^{e}	1bab072
6000	20:1	8000	52 (126°f)	$_{Cldy}10^{e}$	Inc.	$_{Lt.S}1^{s}$	Lt.S	S	1bab126
6000	20:1	8000	67 (153°f)	$_{Cldy}10^{e}$	Inc.	Lt.S	Lt.S	S	1bab153
6000	20:1	8000	75 (167°f)	$_{Cldy}10^{e}$	Inc.	Lt.S	Lt.S	S	1bab167
6000	20:1	16000	22 (72°f)	2^{s}	8^{e}	9^{e}	$_{Inc}8^{e}$	$_{Inc}8^{e}$	1bac072
6000	20:1	16000	52 (126°f)	$_{Cldy}9^{e}$	$_{Cldy}9^{e}$	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}2^{s}$	S	1bac126
6000	20:1	16000	67 (153°f)	$_{Cldy}10^{e}$	$_{Cldy}9^{e}$	S	S	S	1bac153
6000	20:1	16000	75 (167°f)	$_{Cldy}10^{e}$	Inc.	S	Lt.S	S	1bac167
6000	40:1	4000	22 (72°f)	2^{n}	7^{g}	8^{e}	8^{e}	8^{g}	1bba072
6000	40:1	4000	52 (126°f)	8^{e}	8^{e}	8^{g}	8^{e}	8^{g}	1bba126

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
6000	40:1	4000	67 (153°f)	8^{g}	8^{g}	6^{g}	8^{g}	8^{g}	1bba153
6000	40:1	4000	75 (167°f)	9^{g}	8^{g}	7^{s}	2^{s}	2^{s}	1bba167
6000	40:1	8000	22 (72°f)	1^{s}	7^{g}	9^{e}	8^{g}	10^{e}	1bbb072
6000	40:1	8000	52 (126°f)	9^{e}	9^{e}	9^{e}	8^{g}	9^{g}	1bbb126
6000	40:1	8000	67 (153°f)	8^{g}	8^{g}	8^{e}	8^{g}	9^{g}	1bbb153
6000	40:1	8000	75 (167°f)	8^{e}	8^{g}	$_{Cldy}9^{e}$	8^{g}	8^{g}	1bbb167
6000	40:1	16000	22 (72°f)	2^{s}	7^{g}	8^{g}	$_{Inc.}8^{g}$	8^{e}	1bbc072
6000	40:1	16000	52 (126°f)	$_{Cldy}8^{e}$	8^{g}	9^{e}	8^{g}	9^{g}	1bbc126
6000	40:1	16000	67 (153°f)	8^{e}	8^{g}	9^{g}	2^{g}	7^{g}	1bbc153
6000	40:1	16000	75 (167°f)	8^{e}	8^{g}	8^{g}	7^{g}	8^{g}	1bbc167
6000	80:1	4000	22 (72°f)	2^{n}	6^{g}	7^{e}	7^{e}	7^{g}	1bca072
6000	80:1	4000	52 (126°f)	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	1bca126
6000	80:1	4000	67 (153°f)	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	1bca153
6000	80:1	4000	75 (167°f)	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	2^{s}	1bca167
6000	80:1	8000	22 (72°f)	1^{s}	7^{g}	7^{e}	7^{e}	8^{e}	1bcb072
6000	80:1	8000	52 (126°f)	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	1bcb126
6000	80:1	8000	67 (153°f)	7^{e}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	8^{g}	1bcb153
6000	80:1	8000	75 (167°f)	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	1bcb167
6000	80:1	16000	22 (72°f)	2^{s}	5^{g}	3^{s}	3^{g}	3^{g}	1bcc072
6000	80:1	16000	52 (126°f)	7^{e}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	1bcc126
6000	80:1	16000	67 (153°f)	7^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	8^{g}	1bcc153
6000	80:1	16000	75 (167°f)	7^{g}	7^{g}	7-s	7^{g}	6^{g}	1bcc167

Fuente: El autor.

Tabla 3. Resultados de análisis tipo Sydansk a 8.000 PPM.

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
8000	20:1	4000	22 (72°f)	7^{g}	7^{g}	9^{e}	10^{e}	10^{e}	1caa072
8000	20:1	4000	52 (126°f)	9^{e}	$_{Cldy}10^{e}$	Inc.	Lt.S	Lt.S	1caa126
8000	20:1	4000	67 (153°f)	$_{Cldy}10^{e}$	9^{e}	$_{Lt.S}1^{n}$	$_{Lt.S}1^{g}$	Lt.S	1caa153
8000	20:1	4000	75 (167°f)	$_{Cldy}10^{e}$	9^{e}	$_{Cldy}10^{e}$	2^{g}	Lt.S	1caa167
8000	20:1	8000	22 (72°f)	7^{s}	9^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	1cab072
8000	20:1	8000	52 (126°f)	$_{Cldy}10^{e}$	10^{e}	Inc.	Lt.S	Lt.S	1cab126
8000	20:1	8000	67 (153°f)	$_{Cldy}10^{e}$	3^{g}	Inc.	Lt.S	Lt.S	1cab153

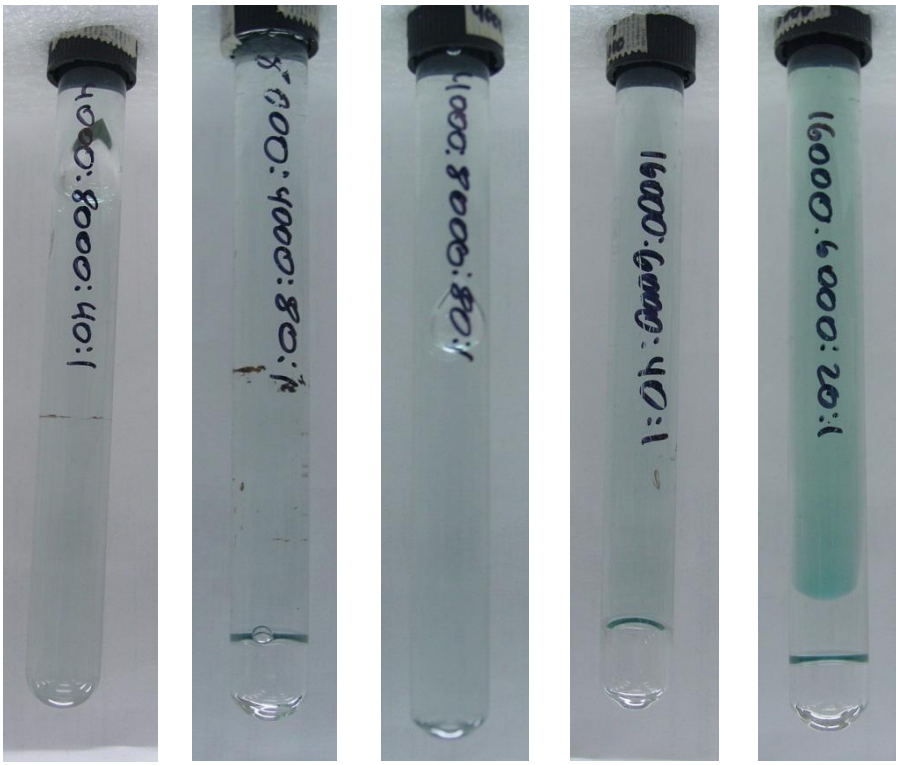
				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
8000	20:1	8000	75 (167°f)	$_{Cldy}10^{e}$	10^{e}	Lt.S	2^{g}	Lt.S	1cab167
8000	20:1	16000	22 (72°f)	5^{g}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	1cac072
8000	20:1	16000	52 (126°f)	9^{e}	10^{e}	Lt.S	Lt.S+	Lt.S	1cac126
8000	20:1	16000	67 (153°f)	9^{e}	Lt.S	Lt.S	Lt.S	Lt.S	1cac153
8000	20:1	16000	75 (167°f)	10^{e}	Lt.S	Lt.S	Lt.S	1^{n}	1cac167
8000	40:1	4000	22 (72°f)	2^{s}	6^{e}	8^{e}	9^{e}	10^{e}	1cba072
8000	40:1	4000	52 (126°f)	9^{e}	8^{g}	8^{e}	10^{g}	10^{g}	1cba126
8000	40:1	4000	67 (153°f)	8^{e}	8^{e}	8^{g}	8^{g}	9^{g}	1cba153
8000	40:1	4000	75 (167°f)	10^{e}	8^{e}	$_{Cldy}10^{e}$	8^{g}	9^{g}	1cba167
8000	40:1	8000	22 (72°f)	2^{s}	8^{g}	9^{e}	9^{g}	10^{g}	1cbb072
8000	40:1	8000	52 (126°f)	10^{e}	9^{e}	10^{e}	9^{g}	10^{g}	1cbb126
8000	40:1	8000	67 (153°f)	10^{e}	9^{s}	10^{e}	9^{g}	10^{g}	1cbb153
8000	40:1	8000	75 (167°f)	$_{Cldy}10^{e}$	8^{g}	9^{g}	2^{g}	2^{g}	1cbb167
8000	40:1	16000	22 (72°f)	5^{s}	9^{e}	9^{g}	10^{e}	10^{e}	1cbc072
8000	40:1	16000	52 (126°f)	9^{g}	10^{e}	9^{e}	10^{g}	10^{g}	1cbc126
8000	40:1	16000	67 (153°f)	9^{g}	10^{e}	8^{g}	10^{g}	10^{g}	1cbc153
8000	40:1	16000	75 (167°f)	9^{g}	9^{g}	8^{g}	9^{g}	10^{g}	1cbc167
8000	80:1	4000	22 (72°f)	2^{s}	4^{s}	7^{g}	8^{g}	8^{g}	1cca072
8000	80:1	4000	52 (126°f)	8^{g}	7^{g}	7-e	8^{g}	8^{g}	1cca126
8000	80:1	4000	67 (153°f)	8^{g}	7^{g}	8^{g}	7^{g}	8^{g}	1cca153
8000	80:1	4000	75 (167°f)	9^{g}	7^{s}	7^{g}	7^{g}	2^{s}	1cca167
8000	80:1	8000	22 (72°f)	1^{s}	7^{g}	8^{e}	8^{g}	10^{g}	1ccb072
8000	80:1	8000	52 (126°f)	8^{g}	8^{e}	8^{g}	7^{g}	8^{e}	1ccb126
8000	80:1	8000	67 (153°f)	9^{g}	8^{g}	$_{Cldy}8^{g}$	7^{g}	8^{g}	1ccb153
8000	80:1	8000	75 (167°f)	8^{g}	7^{g}	7^{g}	7^{g}	8^{g}	1ccb167
8000	80:1	16000	22 (72°f)	1^{n}	8^{g}	8^{g}	9^{g}	10^{g}	1ccc072
8000	80:1	16000	52 (126°f)	8-e	9^{e}	8^{g}	8^{g}	9^{g}	1ccc126

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
8000	80:1	16000	67 (153°f)	8^{g}	8^{g}	7^{g}	9^{g}	9^{g}	1ccc153
8000	80:1	16000	75 (167°f)	8^{g}	7^{s}	7^{g}	1^{s}	9^{g}	1ccc167

Fuente: El autor.

La figura 10 presenta algunas imágenes correspondientes a las formulaciones preparadas con P1.

Figura 10. Algunas soluciones preparadas con P1.

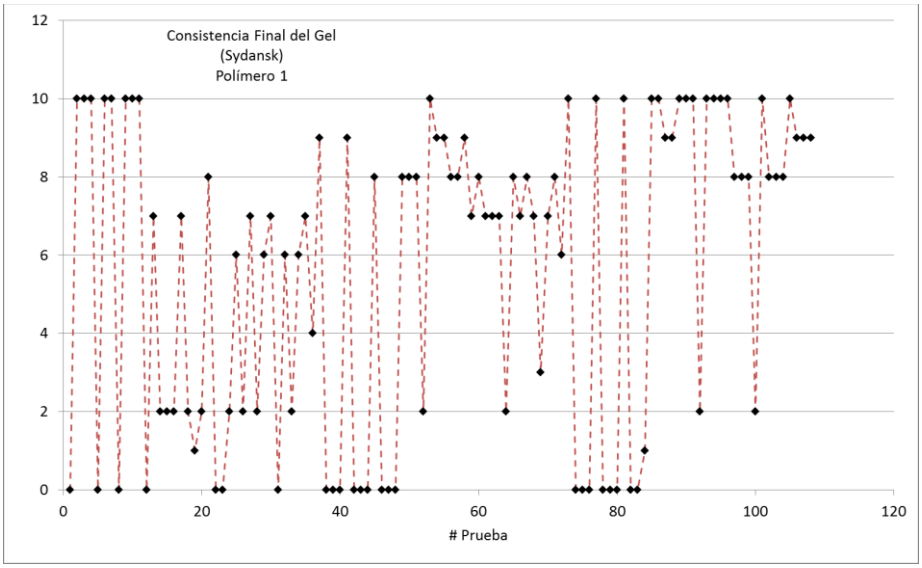


Fuente: El autor.

Del análisis de los resultados obtenidos es claro que la formación del gel polimérico no obedece a una tendencia particular bajo las variables analizadas. La figura 11 presenta los 108 resultados obtenidos con P1, evidenciando una amplia dispersión.

Para identificar las tendencias a las que obedece la reacción bajo estudio se realizaron diferentes análisis, tratando de observar relaciones lógicas entre las diferentes variables. Todos los análisis realizados, para ambos polímeros, se presentan en el Anexo A.

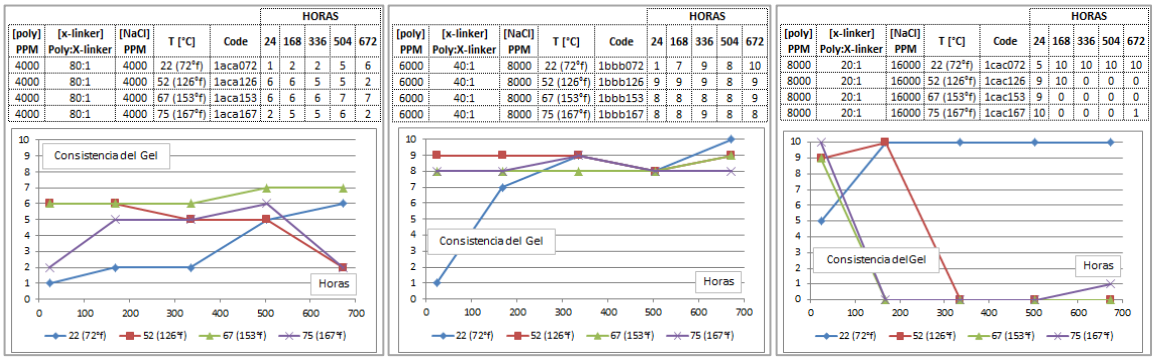
Figura 11. Dispersión de los resultados obtenidos.



Fuente: El autor.

La figura 12 presenta el efecto de la temperatura sobre tres reacciones específicas.

Figura 12. Efecto de la temperatura sobre reacciones específicas.



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	4000	22 (72°f)	1aca072	1	2	2	5	6
4000	80:1	4000	52 (126°f)	1aca126	6	6	5	5	2
4000	80:1	4000	67 (153°f)	1aca153	6	6	6	7	7
4000	80:1	4000	75 (167°f)	1aca167	2	5	5	6	2

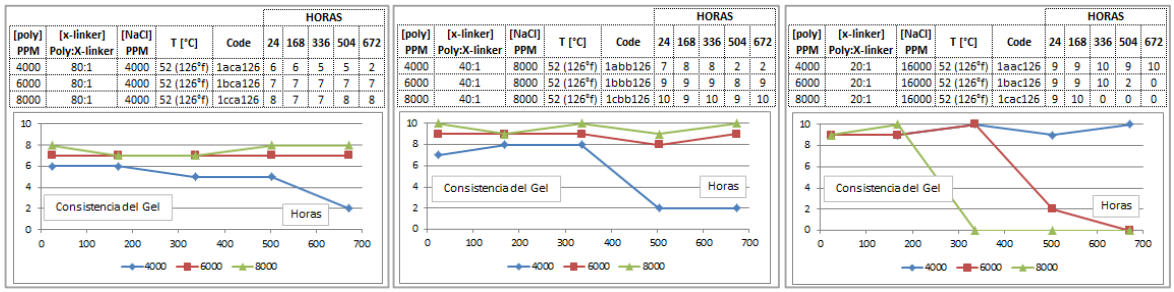
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	40:1	8000	22 (72°f)	1bbb072	1	7	9	8	10
6000	40:1	8000	52 (126°f)	1bbb126	9	9	9	8	9
6000	40:1	8000	67 (153°f)	1bbb153	8	8	8	8	9
6000	40:1	8000	75 (167°f)	1bbb167	8	8	9	8	8

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	20:1	16000	22 (72°f)	1cac072	5	10	10	10	10
8000	20:1	16000	52 (126°f)	1cac126	9	10	0	0	0
8000	20:1	16000	67 (153°f)	1cac153	9	0	0	0	0
8000	20:1	16000	75 (167°f)	1cac167	10	0	0	0	1

Fuente: El autor.

La figura 13 presenta el efecto de variar la concentración del polímero, a temperatura constante, sobre tres (3) reacciones específicas de la figura 11.

Figura 13. Efecto de [Poly], a temperatura constante, sobre reacciones específicas.



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	4000	52 (126°f)	1aca126	6	6	5	5	2
6000	80:1	4000	52 (126°f)	1bca126	7	7	7	7	7
8000	80:1	4000	52 (126°f)	1cca126	8	7	7	8	8

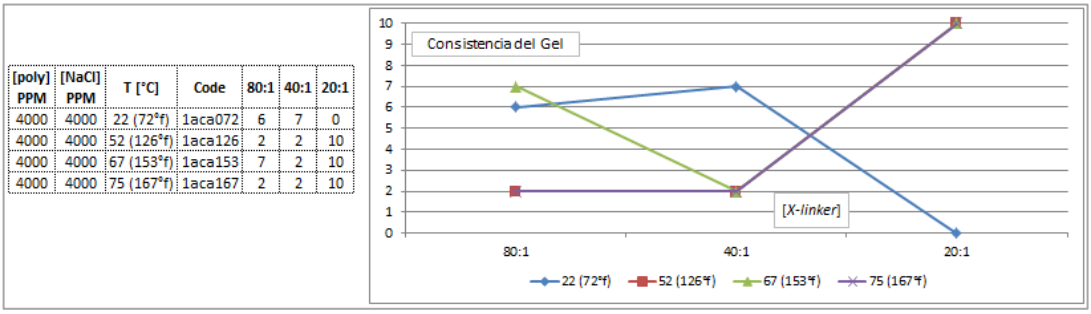
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	8000	52 (126°f)	1abb126	7	8	8	2	2
6000	40:1	8000	52 (126°f)	1bbb126	9	9	9	8	9
8000	40:1	8000	52 (126°f)	1cbb126	10	9	10	9	10

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	16000	52 (126°f)	1aac126	9	9	10	9	10
6000	20:1	16000	52 (126°f)	1bac126	9	9	10	2	0
8000	20:1	16000	52 (126°f)	1cac126	9	10	0	0	0

Fuente: El autor.

La figura 14 presenta los cambios originados en una reacción, al tiempo final de observación, al variar las condiciones de concentración del *x-linker* y temperatura sobre una reacción a concentración de NaCl constante.

Figura 14. Efecto de [*x-linker*] y temperatura a [NaCl] constante.



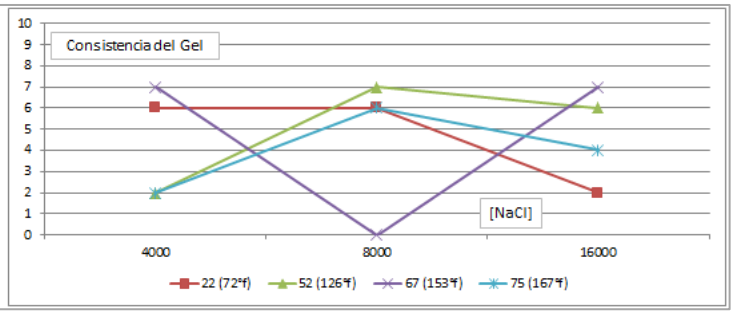
[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	4000	22 (72°f)	1aca072	6	7	0
4000	4000	52 (126°f)	1aca126	2	2	10
4000	4000	67 (153°f)	1aca153	7	2	10
4000	4000	75 (167°f)	1aca167	2	2	10

Fuente: El autor.

La figura 15 presenta los cambios originados en una reacción, al tiempo final de observación, al variar las condiciones de concentración del NaCl y temperatura sobre una reacción a [*x-linker*] constante.

Figura 15. Efecto de [NaCl] y temperatura a [*x-linker*] constante.

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	80:1	22 (72°f)	1aca072	6	6	2
4000	80:1	52 (126°f)	1aca126	2	7	6
4000	80:1	67 (153°f)	1aca153	7	0	7
4000	80:1	75 (167°f)	1aca167	2	6	4



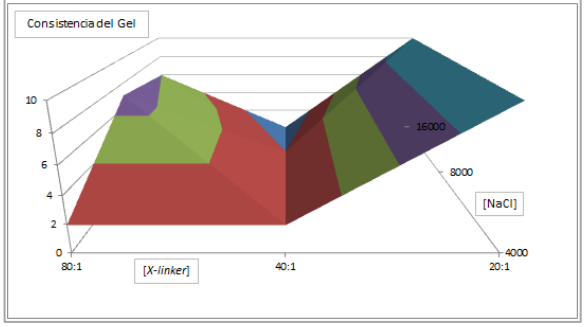
Fuente: El autor.

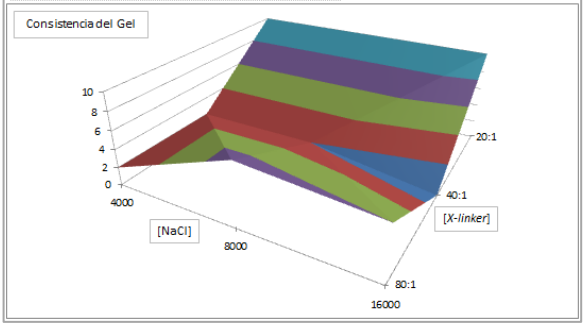
La figura 16 presenta el efecto de variar, a temperatura constante, la concentración de NaCl y de *x-linker* simultáneamente, al tiempo final de observación.

Figura 16. Efecto de [NaCl] y [*x-linker*] a temperatura constante.

[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	4000	52 (126°f)	1aca126	2	2	10
4000	8000	52 (126°f)	1acb126	7	2	10
4000	16000	52 (126°f)	1acc126	6	0	10

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	80:1	52 (126°f)	1aca126	2	7	6
4000	40:1	52 (126°f)	1aba126	2	2	0
4000	20:1	52 (126°f)	1aaa126	10	10	10

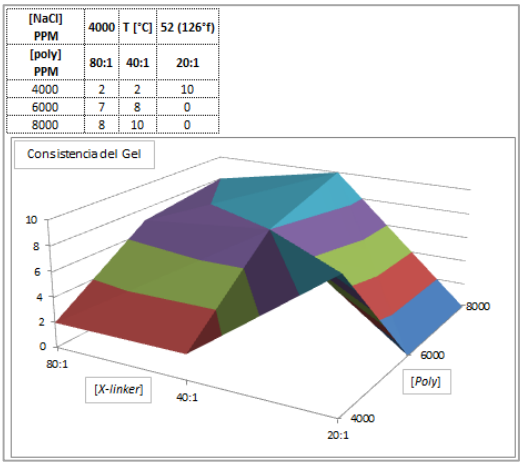




Fuente: El autor.

La figura 17 detalla el efecto de variar la concentración de polímero y *x-linker*, a concentración de NaCl y temperatura constante.

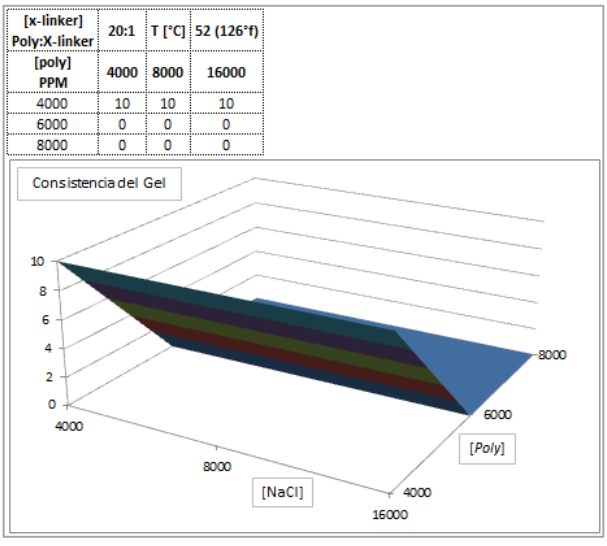
Figura 17. Efecto de [Poly] y [*x-linker*] a [NaCl] y T constante, al tiempo final de observación.



Fuente: El autor.

La figura 18 presenta el efecto de variar la concentración de polímero y NaCl, a concentración *x-linker* y temperatura constante.

Figura 18. Efecto de [Poly] y [NaCl] a [*x-linker*] y T constante.



Fuente: El autor.

Las figuras anteriores, cuatro (12) a diez (18), en todos los casos, evidencian que al modificar las propiedades bajo estudio la reacción nunca tiende a una estabilización en la cual el gel polimérico mantenga su consistencia, o se haga más fuerte; por el contrario, la variación de propiedades por fuera de un rango no determinado, resulta siempre en pérdida de la consistencia del gel.

Lo mencionado en el párrafo anterior es corroborado en cada una de los análisis presentados en el Anexo A. Al variar las condiciones de formulación en una dirección específica, una sola variable en contante disminución o aumento, la consistencia del gel no mantiene una única tendencia. Lo anterior señala que una vez formado el gel continúan dándose interacciones que pueden desestabilizar el mismo, y hace que los mecanismos de funcionamiento no sean claros.

5. PRUEBAS NO CONVENCIONALES PARA DE GELES POLIMÉRICOS

Debido a que las conclusiones que pueden extraerse de los análisis tipo Sydansk realizadas para aplicaciones comerciales no son concluyentes; se presentan aquí pruebas adicionales que permiten mayor entendimiento de los mecanismos de funcionamiento de los geles poliméricos.

La literatura existente identifica las mediciones de espectro ultravioleta como la mejor opción para realizar seguimiento de la reacción que tiene lugar entre una poliacrilamida y un *x-linker*[50], por lo cual se procede a analizar una serie de reacciones específicas por medio de esta técnica.

Dado que P1 presenta reacciones con mayor variación en la consistencia de gel (τ) alcanzada a las 24 horas, este se selecciona para continuar con pruebas adicionales. Para pruebas con espectro ultravioleta se seleccionan aquellas reacciones que presentaron tanto formación rápida (24 horas) del gel como el mayor valor de τ (10) al final del tiempo de análisis (672 horas). La tabla 4 detalla las reacciones que cumplen estas características.

[50] KLAVENESS, Thore & Ruoff, Peter. Op. cit., p. 1.

Tabla 4. Reacciones seleccionadas por la rápida formación y τ final del gel.

Polímero P1									
				HORAS					
[poly]	[x-linker]	[NaCl]	T [°C]	24	168	336	504	672	CODE
4000	20:1	4000	52 (126°f)	8	9	10	10	10	1aaa126
4000	20:1	4000	67 (153°f)	10	10	10	10	10	1aaa153
4000	20:1	4000	75 (167°f)	10	10	10	10	10	1aaa167
4000	20:1	8000	52 (126°f)	8	10	10	10	10	1aab126
4000	20:1	8000	67 (153°f)	10	10	10	10	10	1aab153
4000	20:1	8000	75 (167°f)	9	10	10	10	0	1aab167
4000	20:1	16000	22 (72°f)	1	7	8	8	10	1aac072
4000	20:1	16000	67 (153°f)	10	10	10	10	10	1aac153
8000	20:1	4000	22 (72°f)	7	7	9	10	10	1caa072
8000	20:1	8000	22 (72°f)	7	9	10	10	10	1cab072
8000	20:1	16000	22 (72°f)	5	10	10	10	10	1cac072
8000	40:1	4000	22 (72°f)	2	6	8	9	10	1cba072
8000	40:1	8000	22 (72°f)	2	8	9	9	10	1cbb072
8000	40:1	16000	22 (72°f)	5	9	9	10	10	1cbc072
8000	80:1	8000	22 (72°f)	1	7	8	8	10	1ccb072
8000	80:1	16000	22 (72°f)	1	8	8	9	10	1ccc072

Fuente: El autor.

5.1 Pruebas tipo Sydansk cortas (12 horas)

Las reacciones presentadas en la tabla 4 son realizadas nuevamente, siendo esta vez monitoreadas cada hora durante 12 horas. Cuatro de estas reacciones fueron llevadas nuevamente hasta 672 horas (1 mes) con el objeto de contar con una mejor base de análisis. La tabla 5 presenta los resultados obtenidos para las pruebas de código Sydansk 12 horas.

Tabla 5. Resultados código Sydansk 12 horas.

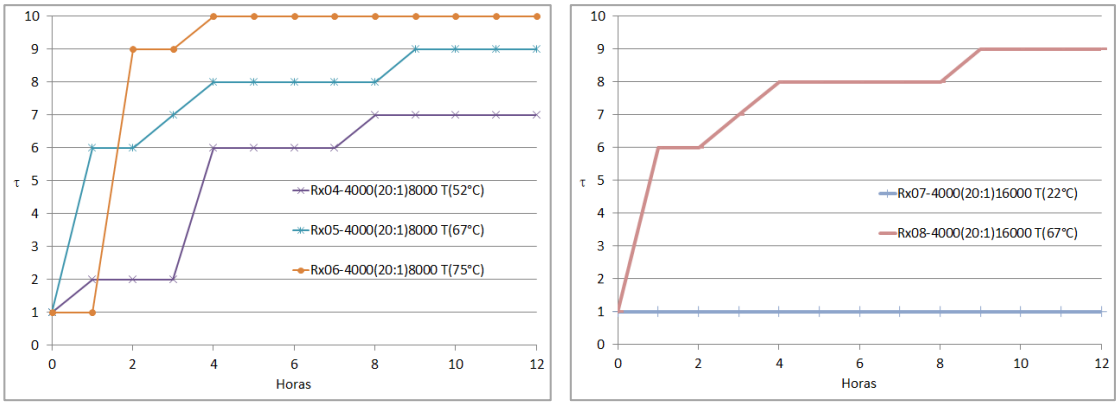
							Sydansk - 12 horas											
Reacción	[poly]	[x-linker]	[NaCl]	T [°C]	Tiempo (Horas)	Tiempo (Horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rx01	4000	20:1	4000	52	12		1	2	2	2	6	6	6	6	7	7	7	7	7
Rx02	4000	20:1	4000	67	12		1	6	6	7	8	8	8	8	8	9	9	9	9
Rx03	4000	20:1	4000	75	12		1	1	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Rx04	4000	20:1	8000	52	12		1	2	2	2	6	6	6	6	7	7	7	7	7
Rx05	4000	20:1	8000	67	12		1	6	6	7	8	8	8	8	8	9	9	9	9
Rx06	4000	20:1	8000	75	12		1	1	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Rx07	4000	20:1	16000	22	12	672	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rx08	4000	20:1	16000	67	12		1	6	6	7	8	8	8	8	8	9	9	9	9
Rx09	8000	20:1	4000	22	12		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Rx10	8000	20:1	8000	22	12		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Rx11	8000	20:1	16000	22	12		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Rx12	8000	40:1	4000	22	12	672	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Rx13	8000	40:1	8000	22	12	672	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rx14	8000	40:1	16000	22	12		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Rx15	8000	80:1	8000	22	12		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rx16	8000	80:1	16000	22	12	672	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: El autor.

En la tabla anterior es claro que aumentar [poly], a bajas temperaturas, no proporciona mayor velocidad en la formación del gel. Lo anterior puede sugerir que altas concentraciones de polímero son importantes para la duración del gel en el tiempo, más no para la velocidad de su formación. Puede observarse también que 12 horas después de preparada la mezcla sólo las temperaturas mayores a 22°C (72°f) presentan formación de gel, con un rápido aumento en el τ de los mismos. Los dos hallazgos anteriores evidencian que la tecnología es susceptible de falla tanto por no formar gel a bajas temperaturas, como por poder formarlo rápidamente cuando esta aumenta.

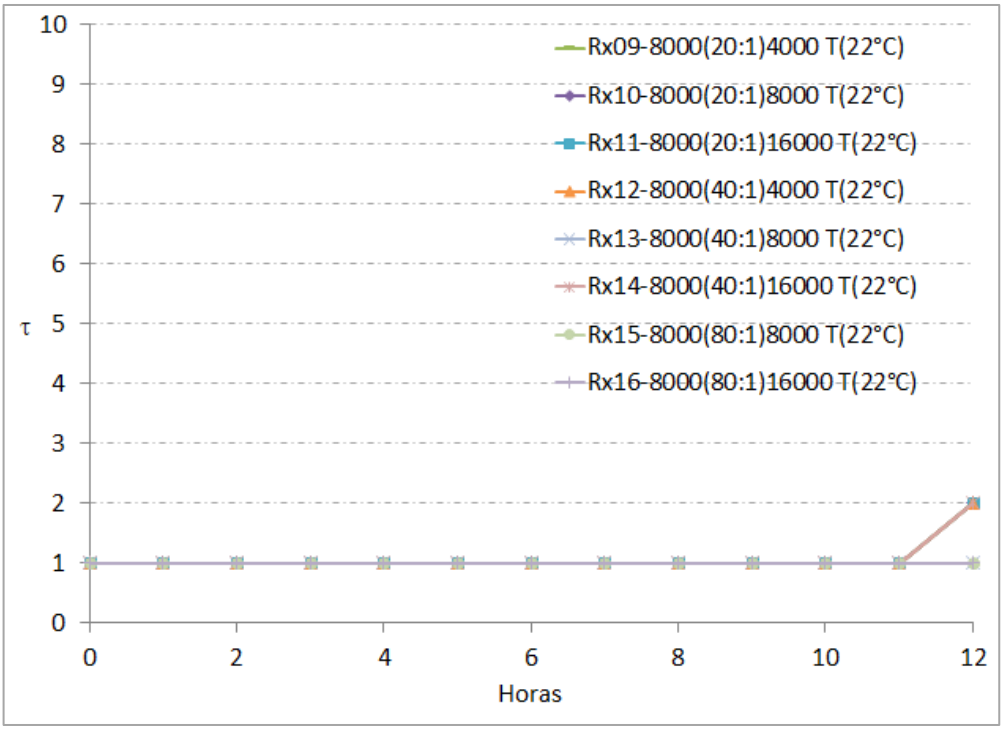
Las figuras 19 y 20 evidencian lo descrito anteriormente, siendo clara para una misma reacción su dependencia de la temperatura.

Figura 19. Resultados código Sydansk 12 horas con variación de la T.



Fuente: El autor.

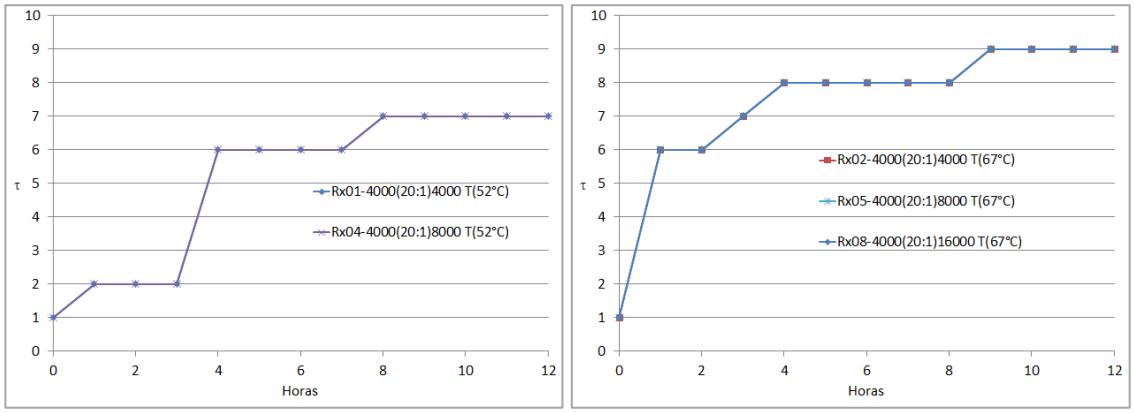
Figura 20. Resultados código Sydansk 12 horas a T constante.



Fuente: El autor.

La figura 21 presenta la variación de las reacciones bajo estudio frente al cambio en [NaCl] a temperatura constante. En ellas se observa que a tiempos cortos [NaCl] no es relevante para la formación del gel, esta cobra importancia para la estabilidad del mismo a tiempos mayores, y por lo tanto para conocer si un tratamiento durará en el tiempo.

Figura 21. Resultados código Sydansk 12 horas con variación de [NaCl] a T constante.

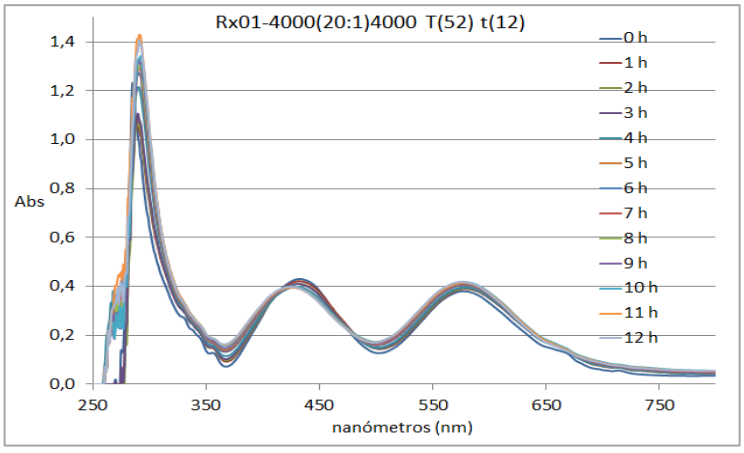


Fuente: El autor.

5.2 Pruebas de espectro ultravioleta (UV)

Una imagen característica del espectro UV para la reacción aquí estudiada se presenta en la figura 22. En ella se toma el resultado del UV para la Rx-01 de la tabla 5 cada hora durante 12 horas.

Figura 22. Espectro UV típico de la mezcla bajo estudio.

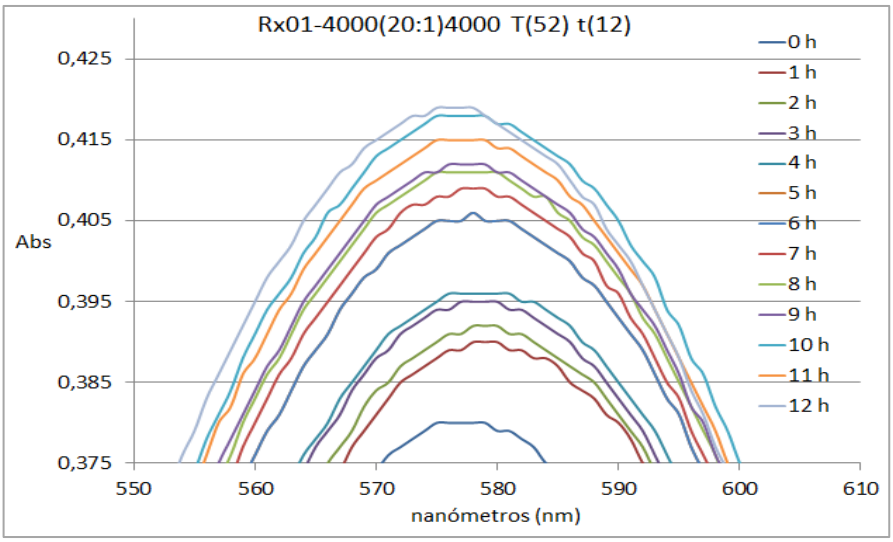


Fuente: El autor.

Los estudios de klaveness[51] detallan que para esta reacción el gel formado debe monitorearse cerca a los 570 nanómetros, de manera que mientras τ aumenta la absorbancia en dicha longitud de onda debe aumentar. Cuando la reacción no ocurra más la absorbancia debe mantener el mismos valor, y en caso de disminuir τ esta debería también disminuir.

La figura 23 presenta un acercamiento a la figura 22 alrededor de la longitud de onda deseada.

Figura 23. Acercamiento a la figura 22 cerca a los 570 nanómetros.

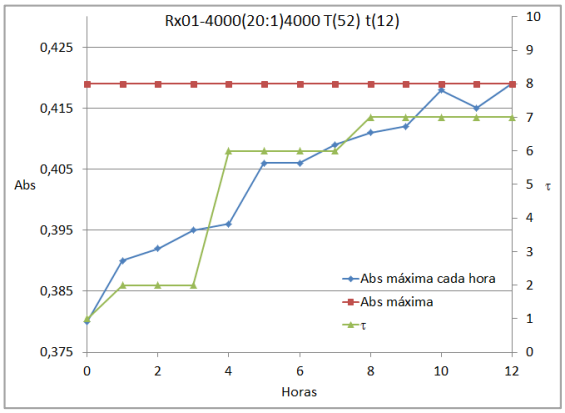


Fuente: El autor.

Para una visión de la evolución de la reacción en el tiempo la figura 24 presenta el máximo de cada espectro UV en el intervalo de interés en función del tiempo. El valor de τ en el mismo momento se presenta en la misma imagen.

[51] KLAVENESS, Thore & Ruoff, Peter. Op. cit., p. 2.

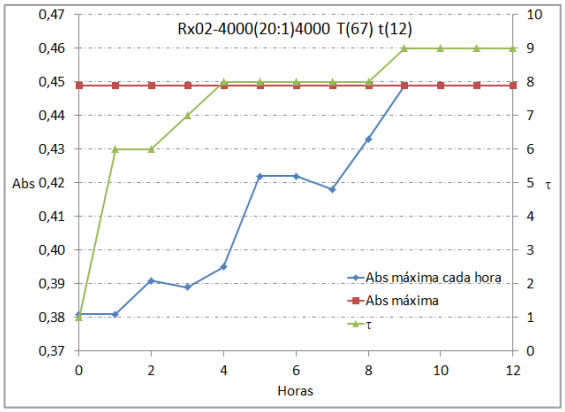
Figura 24. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx01.



Fuente: El autor.

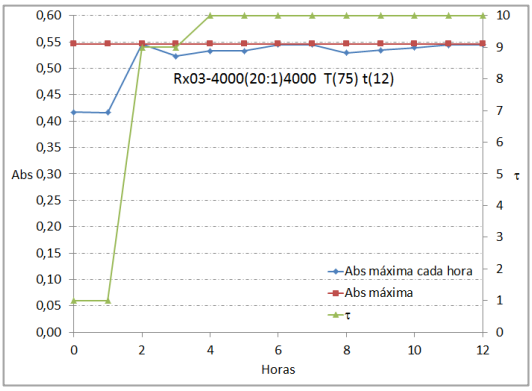
Para las reacciones 2 a 16 en tabla5 las figuras 25 a 43 presentan el mismo análisis de la figura 24 para la reacción 1, incluyendo las cuatro reacciones a 672 horas.

Figura 25. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx02.



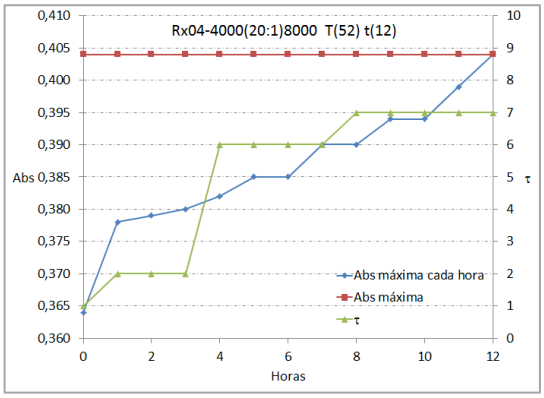
Fuente: El autor.

Figura 26. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx03.



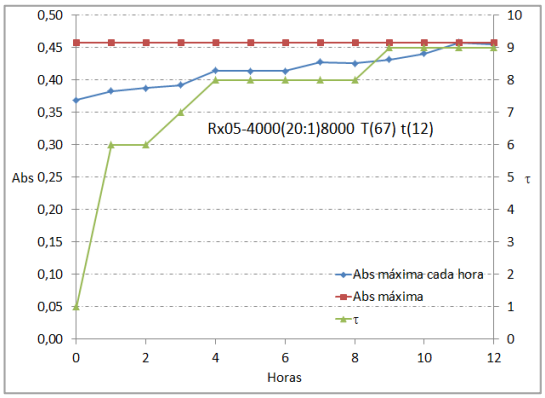
Fuente: El autor.

Figura 27. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx04.



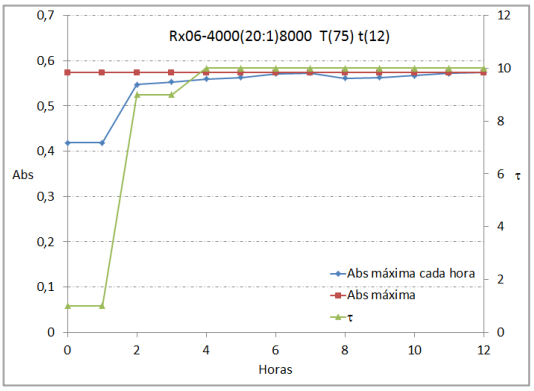
Fuente: El autor.

Figura 28. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx05.



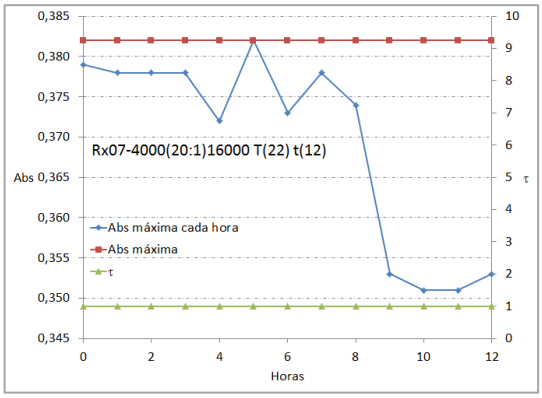
Fuente: El autor.

Figura 29. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx06.



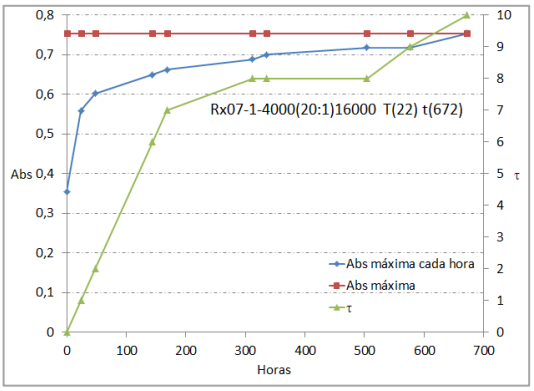
Fuente: El autor.

Figura 30. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx07.



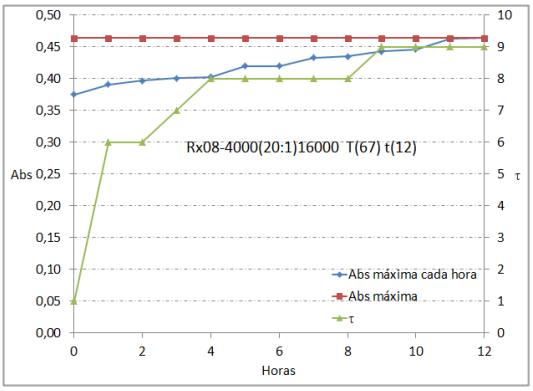
Fuente: El autor.

Figura 31. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx07-1.



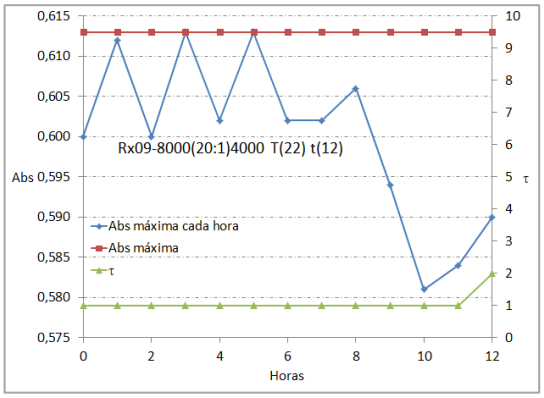
Fuente: El autor.

Figura 32. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx08.



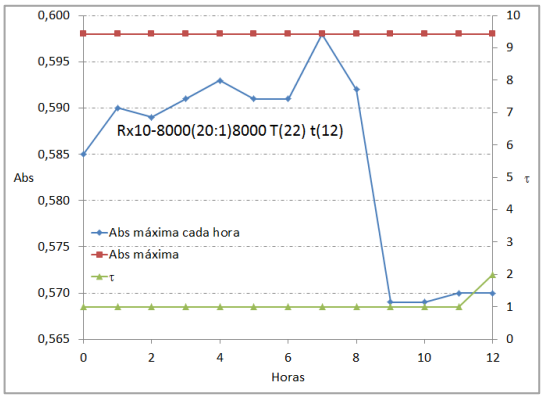
Fuente: El autor.

Figura 33. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx09.



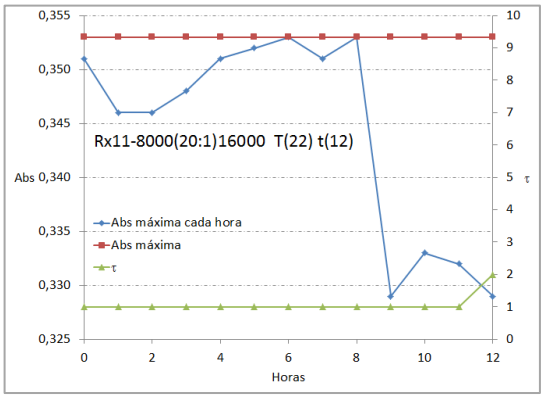
Fuente: El autor.

Figura 34. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx10.



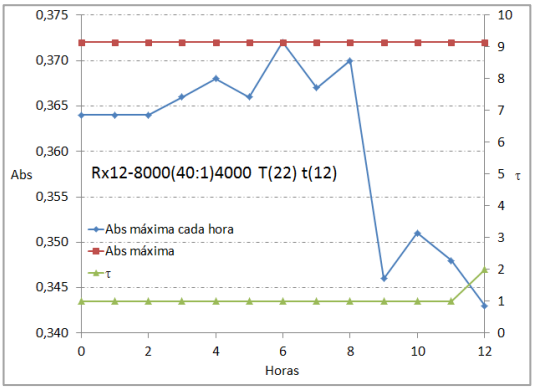
Fuente: El autor.

Figura 35. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx11.



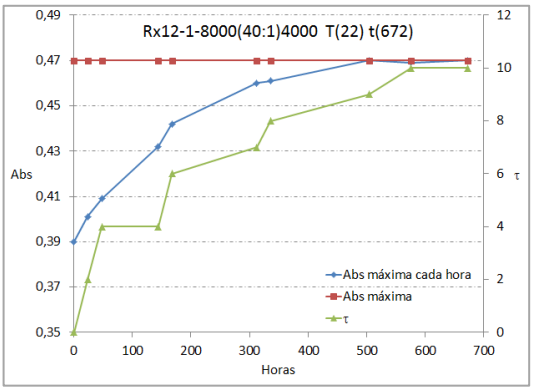
Fuente: El autor.

Figura 36. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx12.



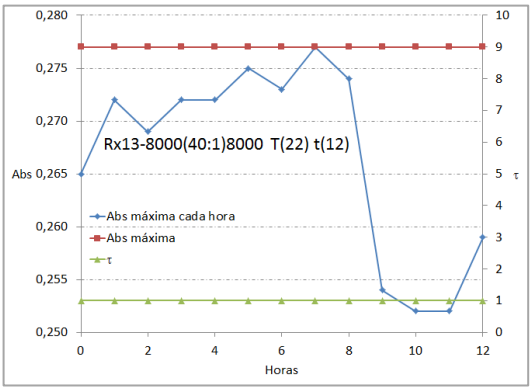
Fuente: El autor.

Figura 37. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx12-1.



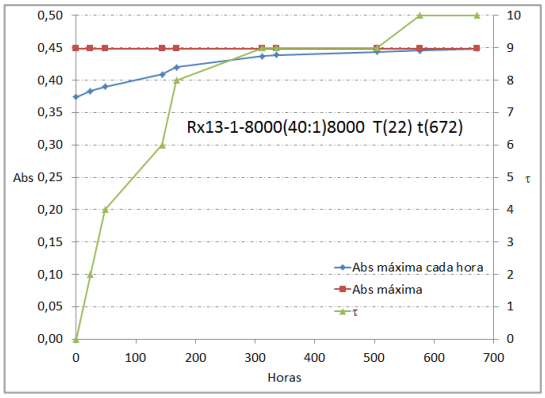
Fuente: El autor.

Figura 38. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx13.



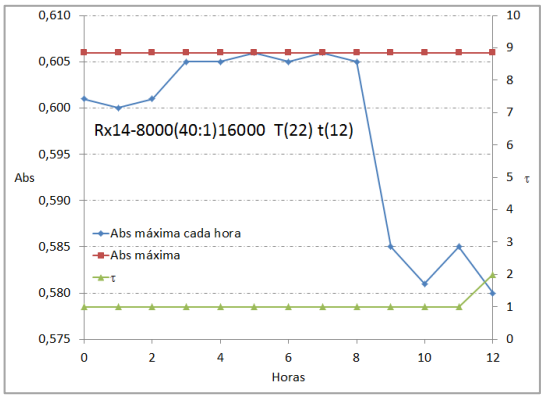
Fuente: El autor.

Figura 39. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx13-1.



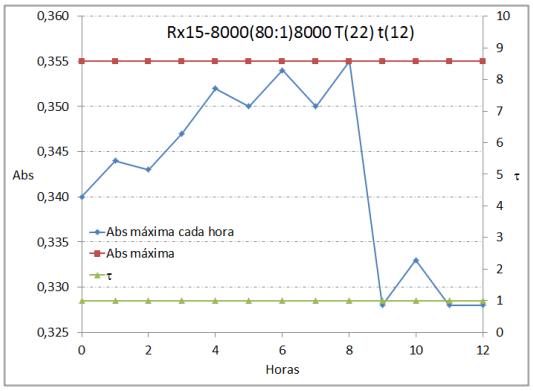
Fuente: El autor.

Figura 40. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx14.



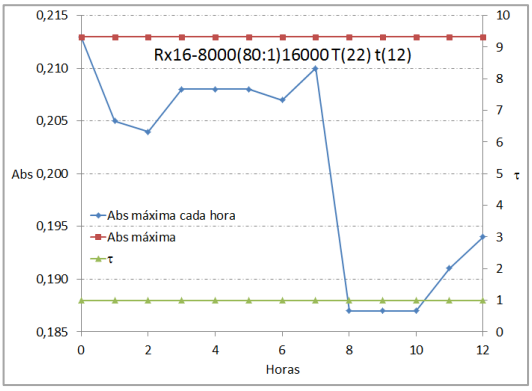
Fuente: El autor.

Figura 41. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx15.



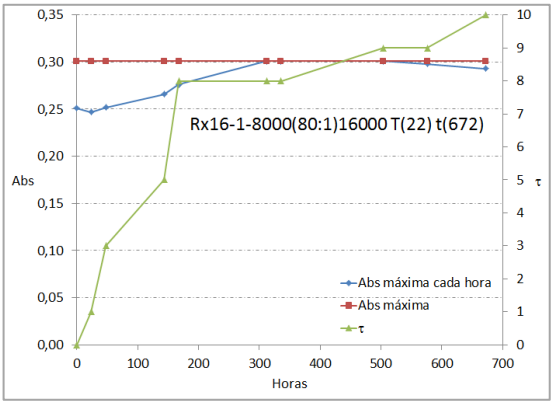
Fuente: El autor.

Figura 42. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx16.



Fuente: El autor.

Figura 43. Análisis en función del tiempo de los espectros UV y τ para Rx16-1.



Fuente: El autor.

Un análisis como el realizado en las figuras anteriores debe sumarse a las pruebas tipo Sydansk realizadas comercialmente para determinar si un gel polimérico se formará a las condiciones particulares de un agua de formación. La prueba tradicional arroja respuesta sobre la duración del gel durante un tiempo determinado (típicamente 1 mes), pero no permite establecer la velocidad a la que este se forma. El estudio del espectro UV de una mezcla dada, inicialmente cada hora durante las primeras 12 horas, y posteriormente cada día hasta el día 30, configuran un procedimiento más adecuado para decidir sobre la conveniencia de esta tecnología para un set de condiciones particulares.

5.3 Efecto de iones Ca^{++}, Mg^{++} y Fe^{++} sobre la formación de gel polimérico

Parte importante del comportamiento de la formación de gel polimérico en condiciones de campo obedece a las características del agua de preparación del mismo. El agua disponible en campos de producción generalmente contiene iones que pueden afectar la formación de geles, y es por esto que resulta importante estudiar el efecto de la presencia de estos iones.

Es un hecho conocido que la presencia de iones Ca^{++}, Mg^{++} y Fe^{++} afecta en forma negativa a las poliacrilamidas utilizadas para la formación de gel polimérico, por lo que se involucran aquí como variables controlables en el análisis. Las concentraciones en solución de los iones utilizados se toman de las aguas normalmente encontradas en los campos Colombianos.

La reacción seleccionada para estudiar el efecto de los iones mencionados corresponde a la reacción Rx02 de la figura 25, principalmente por alcanzar un valor de τ elevado durante un periodo de 12 horas, y con un comportamiento del espectro UV que refleja la variación en τ; además, la temperatura de la reacción no es tan elevada como para una formación súbita del gel.

La figura 44 presenta el diseño experimental para pruebas Sydansk cortas y UV con iones Ca^{++}, Mg^{++} y Fe^{++}.

Figura 44. Diseño experimental para pruebas con Ca^{++}, Mg^{++} y Fe^{++}.

	Factores	3								
	Polymer	[Polymer]	[x-linker]	Salinidad [NaCl]	T[°C]	Ca^{++} [mg/L]	Mg^{++} [mg/L]	Fe^{++} [mg/L]		Variables Respuesta
	1	4000	20:1	4000	67 (152.6°f)	400	50	1		Tiempo de gelificación
						450	70	5		Consistencia del gel (τ)
Niveles	1	1	1	1	1	2	2	2	8	

Fuente: El autor.

Los valores de Fe^{++} son seleccionados considerando que la norma NACE[52] para calidad de agua de inyección sugiere que esta no contenga más de 1 mg/L de este ion. Los valores de Ca++ y Mg++ no poseen una norma, los valores considerados son tomados de proporciones comunes en aguas de inyección.

La tabla 6 presenta los resultados obtenidos para las pruebas tipo Sydansk de corta duración.

Tabla 6. Resultados obtenidos para las pruebas tipo Sydansk 12 horas.

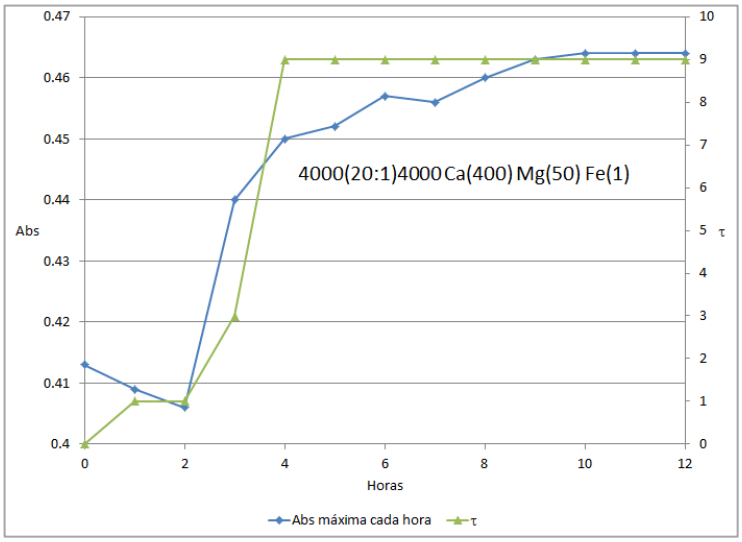
							Horas										
#	[Polymer]	[x-linker]	Salinidad [NaCl]	Ca^{++} [mg/L]	Mg^{++} [mg/L]	Fe^{++} [mg/L]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4000	20:1	4000	400	50	1	1	1	3	9	9	9	9	9	9	9	9	
2	4000	20:1	4000	400	50	5	1	1	1	8	8	9	9	9	9	9	9	
3	4000	20:1	4000	400	70	1	1	1	1	5	5	5	5	5	5	5	7	7
4	4000	20:1	4000	400	70	5	1	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	7
5	4000	20:1	4000	450	50	1	1	1	2	4	4	4	4	4	4	4	5	5
6	4000	20:1	4000	450	50	5	1	1	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5
7	4000	20:1	4000	450	70	1	1	1	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5
8	4000	20:1	4000	450	70	5	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5

Fuente: El autor.

[52] OSTROFF, Anton. 1 ed. Houston: Prentice-Hall, 1979. 394 p. ISBN 978-0915567720.

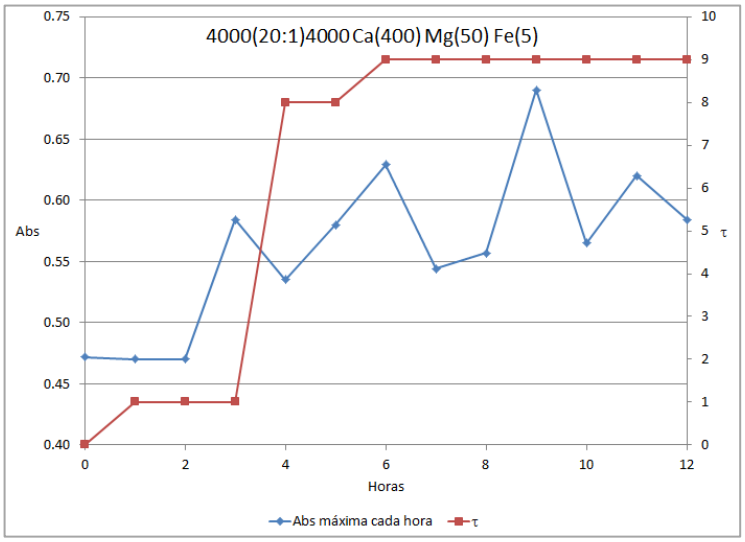
Las figuras 45 a 52 presentan los resultados obtenidos con las pruebas UV, con su correspondiente valor de la prueba tipo Sydansk.

Figura 45. Resultados UV y Sydansk para la prueba 1.



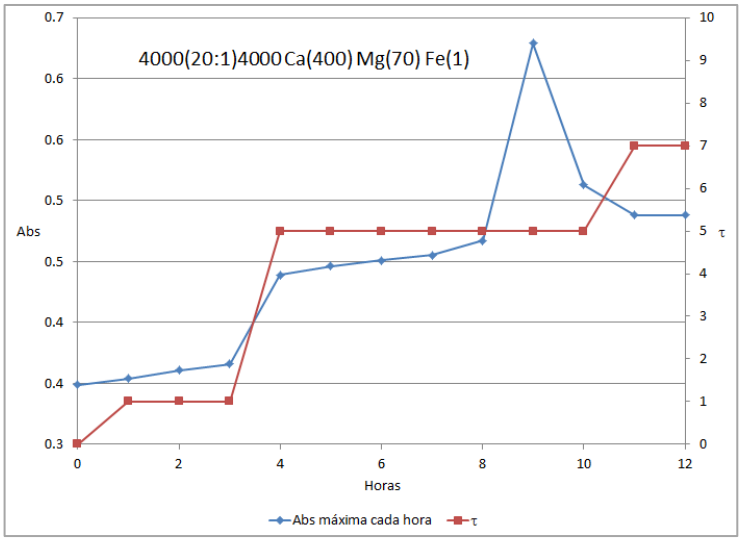
Fuente: El autor.

Figura 46. Resultados UV y Sydansk para la prueba 2.



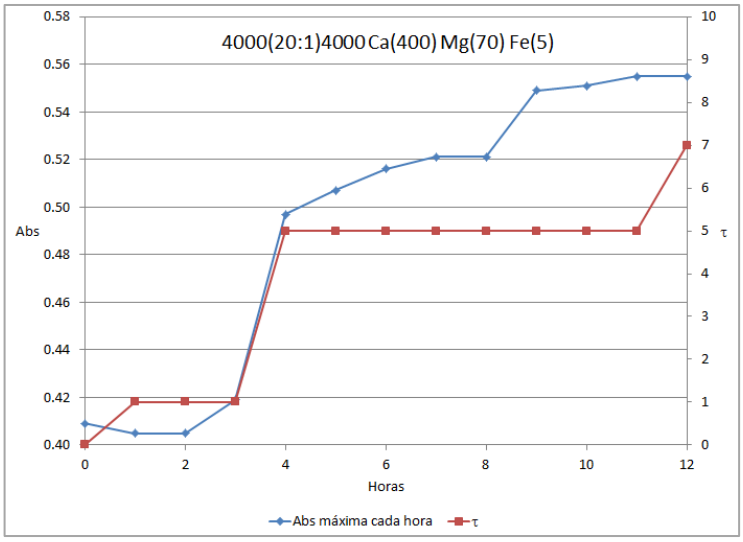
Fuente: El autor.

Figura 47. Resultados UV y Sydansk para la prueba 3.



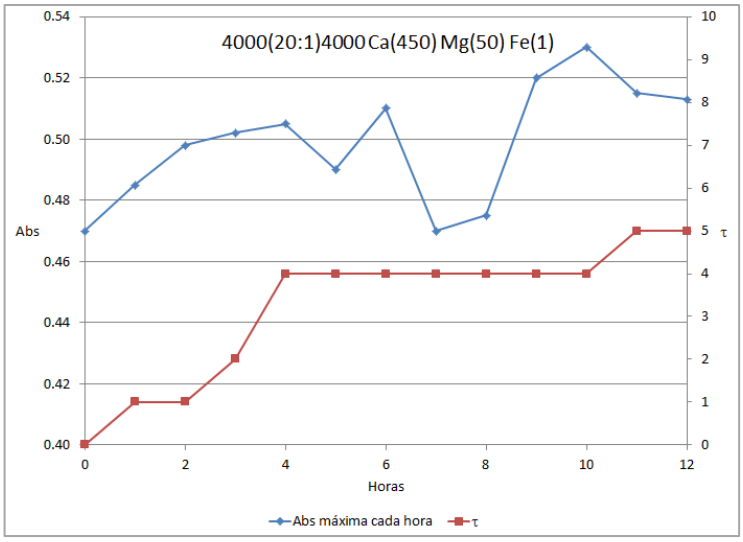
Fuente: El autor.

Figura 48. Resultados UV y Sydansk para la prueba 4.



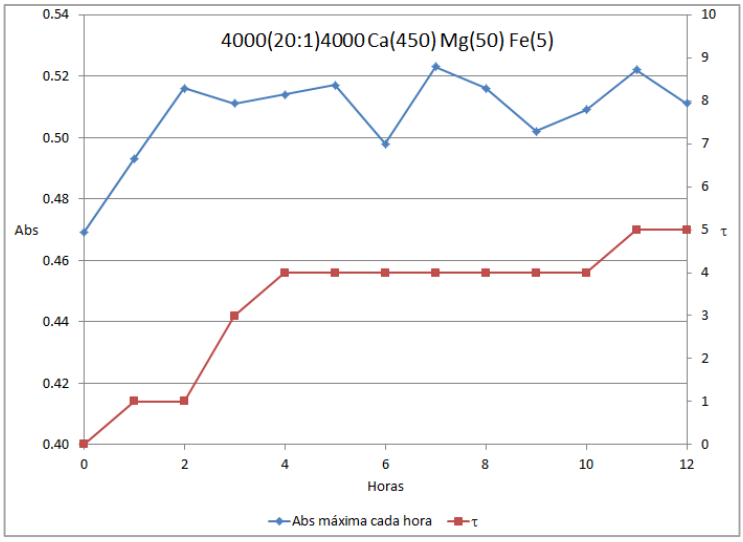
Fuente: El autor.

Figura 49. Resultados UV y Sydansk para la prueba 5.



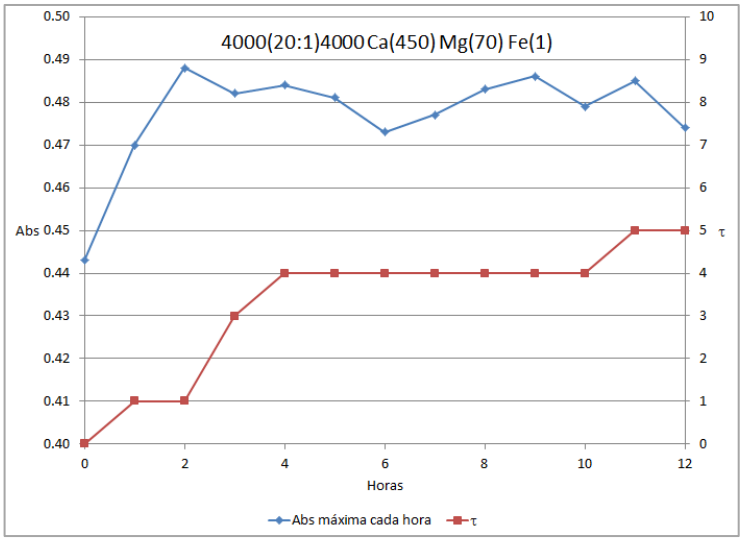
Fuente: El autor.

Figura 50. Resultados UV y Sydansk para la prueba 6.



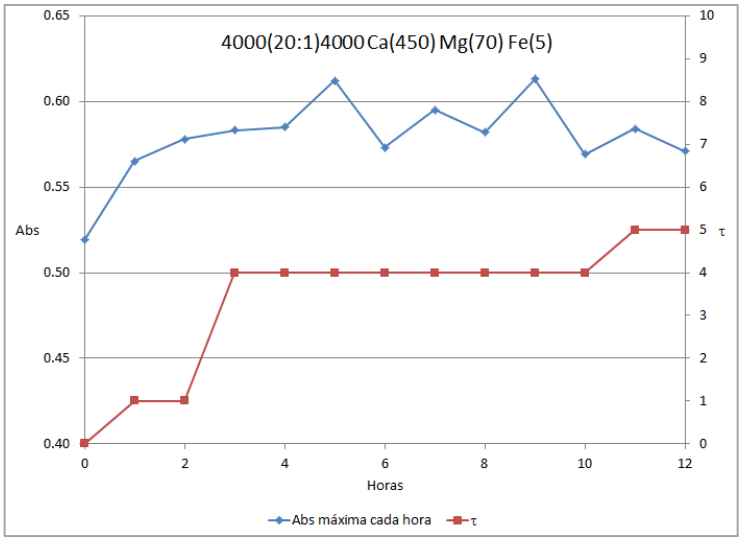
Fuente: El autor.

Figura 51. Resultados UV y Sydansk para la prueba 7.



Fuente: El autor.

Figura 52. Resultados UV y Sydansk para la prueba 8.



Fuente: El autor.

Inicialmente los resultados pueden dividirse entre las cuatro primeras pruebas y las cuatro últimas. Al aumentar [Ca^{++}] en 50 mg/L los resultados en el τ final de la reacción a doce horas caen a valores que convierten el gel en una opción no

viable, por lo que puede concluirse que este es un parámetro de alto impacto en este tipo de reacciones.

El comportamiento de la reacción al variar [Fe^{++}] se observa al comparar las pruebas 1 - 2 (figuras 45 y 46), 3 - 4 (figuras 47 y 48), 5 - 6 (figuras 49 y 50) y 7 – 8 (figuras 51 y 52). En los cuatro casos se aprecia que él τ final del gel no varía al modificar [Fe^{++}], por lo cual, al menos bajo los parámetros de estudio, Fe^{++} no es de influencia directa sobre el gel final obtenido.

El comportamiento de la reacción al variar [Mg^{++}] se observa al comparar las pruebas 1 - 3 (figuras 45 y 47), 2 - 4 (figuras 46 y 48), 5 - 7 (figuras 49 y 51) y 6 – 8 (figuras 50 y 52). En los dos primeros casos, cuando [Ca^{++}] está en su punto bajo, él τ final del gel disminuye al aumentar [Mg^{++}]. En los casos siguientes, cuando [Ca^{++}] está en su punto alto, él τ final del gel no cambia al aumentar [Mg^{++}]. Lo anterior indica que aumentar [Mg^{++}] afecta negativamente el gel obtenido.

En presencia de iones divalentes la respuesta de los análisis con UV no es tan clara como sin los mismos, los valores de absorbancia obtenidos presentan gran variación, por lo que su utilización en este tipo de aguas puede no ser la mejor opción, siendo en este caso mejor el enfoque cualitativo.

5.4 Reología de geles poliméricos

Dado el poco conocimiento en pruebas reológicas de geles poliméricos, un estudio al respecto debe comenzar por identificar la frecuencia adecuada a la que debe trabajar el reómetro seleccionado. La tabla 7 presenta un barrido de frecuencia utilizando la reacción Rx02 ([poly] 4000) / [xlinker] 20:1 / [NaCl] 4000), la cual se identifica como la más adecuada para observar los fenómenos involucrados. La temperatura de prueba se mantuvo durante todo el tiempo en 67°C.

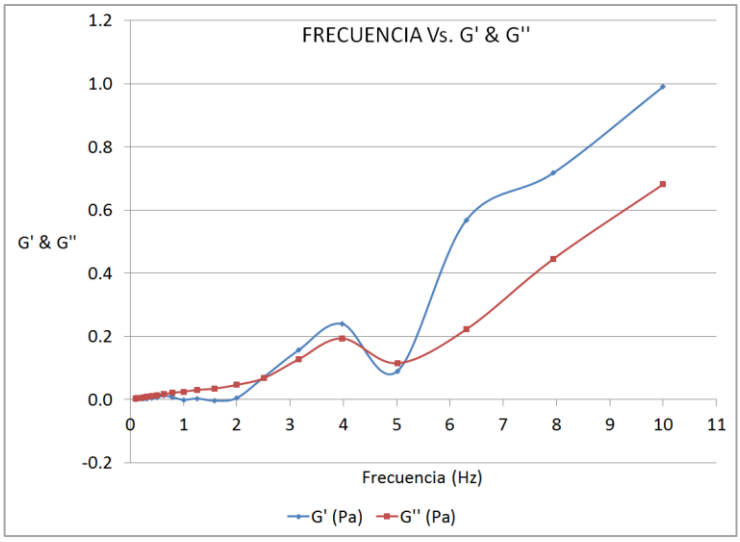
Tabla 7. Barrido de frecuencia para selección de valor de prueba.

Frequency (Hz)	G' (Pa)	G'' (Pa)	Tiempo (min)
0.10000	0.00210	0.00389	0.7
0.12590	0.00253	0.00436	1.0
0.15850	0.00260	0.00503	1.2
0.19950	0.00250	0.00627	1.4
0.25120	0.00248	0.00779	1.5
0.31620	0.00413	0.00932	1.7
0.39810	0.00606	0.01129	1.8
0.50120	**0.00709**	**0.01436**	**1.9**
0.63100	0.01339	0.01802	2.0
0.79430	0.00803	0.02220	2.1
1.00000	-0.00021	0.02540	2.2
1.25900	0.00367	0.03109	2.3
1.58500	-0.00294	0.03536	2.4
1.99500	0.00510	0.04695	2.6
2.51200	0.07181	0.06849	2.7
3.16200	0.15710	0.12800	2.8
3.98100	0.23990	0.19400	2.9
5.01200	0.09006	0.11540	3.4
6.31000	0.56900	0.22290	3.7
7.94300	0.71790	0.44580	4.0
10.00000	0.99060	0.68180	4.3

Fuente: El autor.

La figura 53 corresponde a los valores de G’ (módulo de almacenamiento) y G’’ (módulo de pérdida) presentados en la tabla 7.

Figura 53. Barrido de frecuencia para selección de valor de prueba.



Fuente: El autor.

En la figura y tabla anterior se observa que por encima de 0.6 Hz las tendencias de G’ y G’’ comienzan a variar en forma poco clara. Lo anterior justifica la selección de una frecuencia de 0.5 Hz para estudios reológicos en soluciones poliméricas con *xlinker*.

Utilizando la frecuencia seleccionada en el paso anterior se realiza durante 12 horas prueba reológica para determinación de G’ y G’’. La duración de la prueba corresponde a la búsqueda de coherencia científica con las pruebas tipo Sydansk cortas y de UV realizadas con la misma reacción.

La tabla 8 presenta parte de los resultados obtenidos en la prueba reológica, la figura 54 representa dicha información.

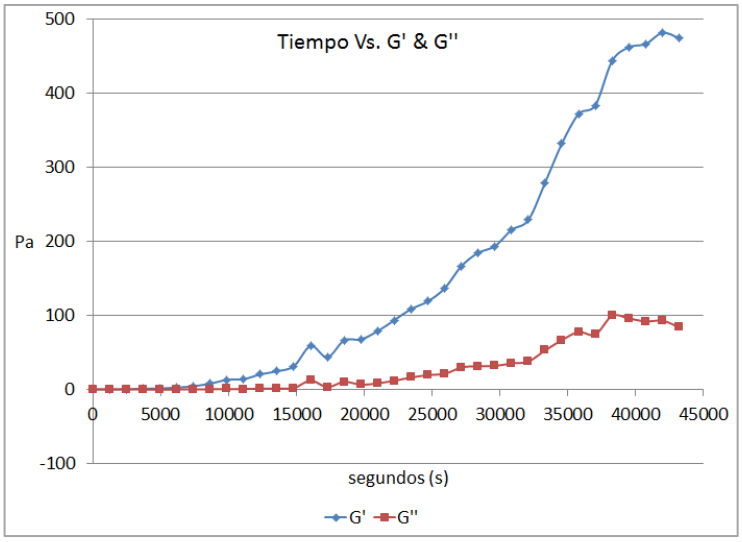
Tabla 8. Resultados de prueba reológica.

time (s)	G' (Pa)	G'' (Pa)	time (s)	G' (Pa)	G'' (Pa)
9.031	0.044	0.079	22220.000	93.720	11.810
1232.800	0.212	0.054	23459.000	108.700	16.470
2467.000	0.483	0.084	24698.000	119.200	19.720
3701.300	1.038	0.119	25923.000	136.700	21.180
4935.600	1.346	-0.272	27162.000	166.700	29.850
6169.800	2.714	0.101	28391.000	184.500	31.680
7404.100	4.387	0.104	29630.000	193.700	31.820
8638.400	7.837	0.353	30860.000	215.700	35.410
9877.200	13.040	0.763	32094.000	229.000	37.880
11111.000	14.030	0.684	33329.000	279.500	52.920
12346.000	20.530	1.103	34563.000	332.200	66.800
13580.000	24.720	1.474	35797.000	372.200	77.750
14814.000	31.610	2.116	37031.000	383.900	74.320
16058.000	58.790	12.090	38266.000	443.800	99.560
17283.000	43.650	3.395	39504.000	462.300	96.070
18526.000	66.430	10.440	40734.000	466.700	92.040
19756.000	67.750	6.616	41973.000	481.800	92.910
20986.000	78.880	8.349	43203.000	474.600	84.100

Fuente: El autor.

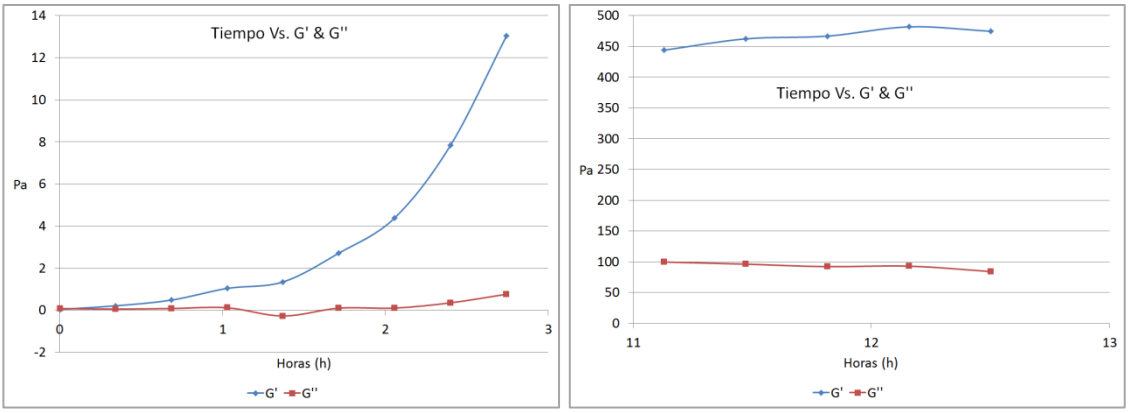
La figura 54 es una imagen clásica de la respuesta esperada en mediciones de G’ y G’’ en soluciones que aumentan su viscosidad con el tiempo. En ella puede observarse para ambos parámetros tanto el momento de inicio de la formación del gel como una etapa final en la que el proceso de formación del mismo ha terminado. La figura 55 presenta el detalle de los dos momentos descritos, en ella se presenta identificación clara de un periodo de formación de gel.

Figura 54. Resultados de prueba reológica.



Fuente: El autor.

Figura 55. Inicio y fin de la formación de gel polimérico.



Fuente: El autor.

Para las condiciones de la reacción bajo estudio el punto de inicio de formación del gel se encuentra cercano a 0.5 horas, mientras que el final de la formación del gel se ubica cerca de las 11 horas. Estos valores se convierten en importantes referencias al momento de hacer seguimiento en campo de procesos de inyección de geles poliméricos.

5.5 Velocidad de reacción en función de G'

La velocidad de una reacción de formación de gel se estudia en la literatura en función del módulo de almacenamiento durante la misma[53]. En este análisis es también importante el ángulo de desfase (α) entre los módulos de almacenamiento y pérdida. La tabla 9 presenta la información obtenida durante la prueba reológica, y la calculada para determinar la velocidad de la reacción en función de G'.

Tabla 9. Resultados de prueba reológica y cálculos para velocidad de reacción en función de G'.

time (s)	time (min)	α (grados)	G' (Pa)	Ln G'	time (s)	time (min)	α (grados)	G' (Pa)	Ln G'
9.0	0.2	60.9	0.044	-3.1	22220.0	370.3	7.185	93.7	4.5
1232.8	20.5	14.4	0.212	-1.6	23459.0	391.0	8.615	108.7	4.7
2467.0	41.1	9.8	0.483	-0.7	24698.0	411.6	9.392	119.2	4.8
3701.3	61.7	6.5	1.038	0.0	25923.0	432.1	8.804	136.7	4.9
4935.6	82.3	5.0	1.346	0.3	27162.0	452.7	10.150	166.7	5.1
6169.8	102.8	2.1	2.714	1.0	28391.0	473.2	9.743	184.5	5.2
7404.1	123.4	1.4	4.387	1.5	29630.0	493.8	9.327	193.7	5.3
8638.4	144.0	2.6	7.837	2.1	30860.0	514.3	9.325	215.7	5.4
9877.2	164.6	3.4	13.040	2.6	32094.0	534.9	9.392	229.0	5.4
11111.0	185.2	2.8	14.030	2.6	33329.0	555.5	10.720	279.5	5.6
12346.0	205.8	3.1	20.530	3.0	34563.0	576.1	11.370	332.2	5.8
13580.0	226.3	3.4	24.720	3.2	35797.0	596.6	11.800	372.2	5.9
14814.0	246.9	3.8	31.610	3.5	37031.0	617.2	10.960	383.9	6.0
16058.0	267.6	4.0	58.790	4.1	38266.0	637.8	12.640	443.8	6.1
17283.0	288.1	4.4	43.650	3.8	39504.0	658.4	11.740	462.3	6.1
18526.0	308.8	5.0	66.430	4.2	40734.0	678.9	11.160	466.7	6.1
19756.0	329.3	5.6	67.750	4.2	41973.0	699.6	10.910	481.8	6.2
20986.0	349.8	6.0	78.880	4.4	43203.0	720.1	10.050	474.6	6.2

Fuente: El autor.

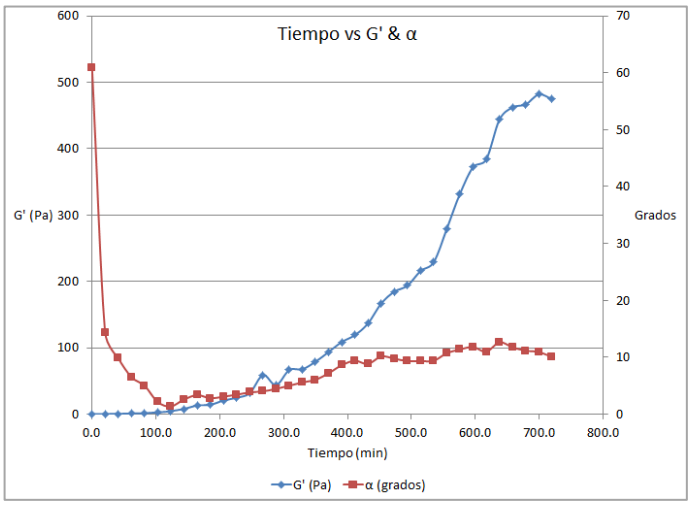
La figura 56 presenta los valores de G' y ángulo de desfase (α) en función del tiempo. El comportamiento obtenido permite caracterizar la reacción de formación

[53] VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE QUÍMICA, INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA. 9-12, OCTUBRE, 2012: La Habana, Cuba. PACHÓN CONTRERAS, Zarith; VILLAR GARCÍA, Álvaro y ROA, Manuel. Análisis de la cinética de gelificación de geles de dispersión coloidal utilizados en procesos de recobro mejorado de petróleo mediante sus propiedades viscoelásticas.

de gel polimérico como de seudo-primer orden[54], considerando que el componente polimérico se encuentra en exceso en la solución, por lo que la estequiometría no se considera en la misma. En la misma figura, el comportamiento del ángulo de desfase es importante. Al descender y mantenerse en valores cercanos a cero muestra la tendencia del gel a comportarse como un sólido, más que como un fluido[55].

La figura 57 presenta el procedimiento de obtención de la velocidad de la reacción bajo estudio, a partir del valor del logaritmo natural de G'. Al mostrar diferentes tendencias lineales la aproximación se divide en tramos, tal como se presenta en la figura.

Figura 56. G' y ángulo de desfase mostrando una reacción de seudo-primer orden.

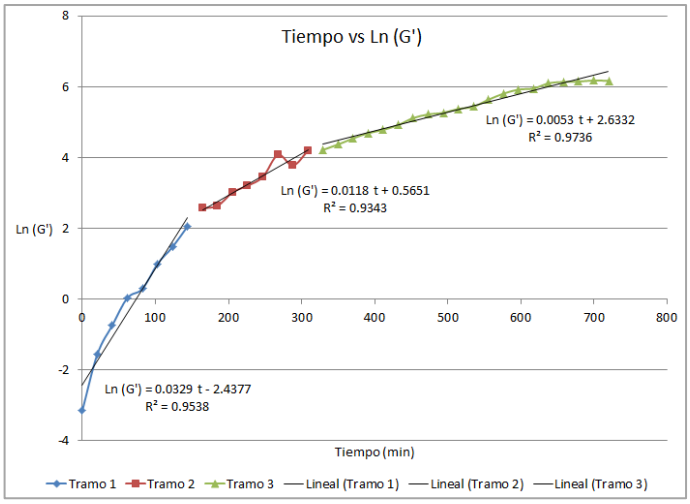


Fuente: El autor.

[54] Ibid., p. 1.

[55] BJØRSVIK, M; HØILAND, H Y SKAUGE, Arne. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Formation of colloidal dispersion gels from aqueous polyacrylamide solutions. Volume 317, 20 marzo, 2008. p. 504 - 511.

Figura 57. Obtención de la velocidad de la reacción bajo estudio.



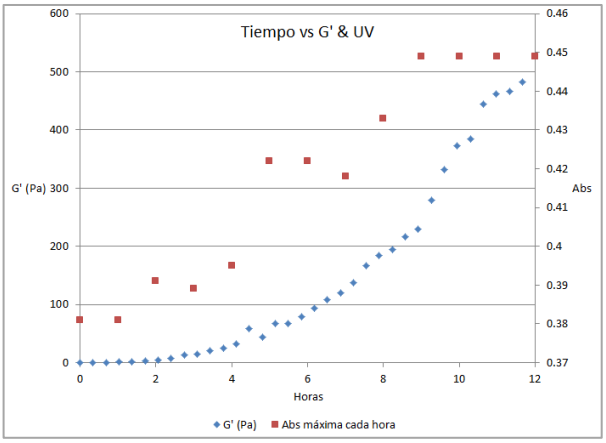
Fuente: El autor.

De la figura anterior puede determinarse que la reacción analizada presenta una velocidad que disminuye hasta terminar la misma, las velocidades obtenidas son 0.0329 min^{-1}, 0.0118 min^{-1} y 0.0053 min^{-1}.

5.6 Pruebas reológicas, UV y Sydansk para geles poliméricos

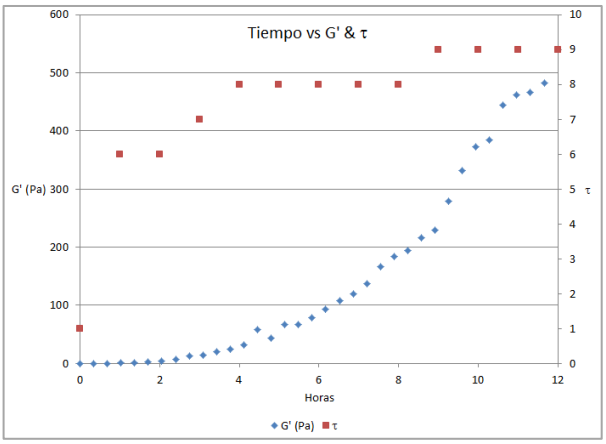
Los diferentes análisis aquí presentados permiten concluir que el monitoreo de soluciones poliméricas puede llevarse a cabo de manera más precisa mediante la utilización de estudios reológicos, sin embargo, los resultados de pruebas ultravioleta y tipo Sydansk aquí presentados muestran coherencia con aquellos obtenidos mediante reología. Las figuras 58 y 59 comparan los resultados obtenidos con las diferentes técnicas para una misma reacción.

Figura 58. Comparativo pruebas reológicas y UV.



Fuente: El autor.

Figura 59. Comparativo pruebas reológicas y tipo Sydansk.



Fuente: El autor.

Las figuras anteriores evidencian que las técnicas UV y Sydansk detectan en forma coherente el inicio y el fin del proceso de formación del gel, así como su tendencia durante el tiempo. Dado que, como se concluyó anteriormente, para un diseño adecuado de gel polimérico de aplicación en campo son necesarias pruebas de larga duración (mayores a un mes), la opción reológica puede ser muy demandante de recursos. Por el contrario, la opción tipo Sydansk, al consistir en una prueba cualitativa que no requiere ningún equipo, se convierte en una opción

fundamental. La utilización del espectro ultravioleta puede postularse como una opción intermedia, sin embargo, el tiempo necesario para el análisis de la información puede ser muy demandante.

6. PRUEBAS FLUIDO – ROCA EN GELES POLIMÉRICOS

El efecto final de un gel polimérico, lo cual es fundamental para el estudio de sus mecanismos de funcionamiento, puede verse únicamente al involucrar pruebas fluido – roca en un diseño que trate de representar la inyección real normalmente realizada en campo. La literatura existente presenta pocos antecedentes de este tipo de pruebas para geles poliméricos[56], orientando las mismas para determinar el posible daño generado en las zonas de poca permeabilidad, pero sin profundizar en los mecanismos de funcionamiento del gel.

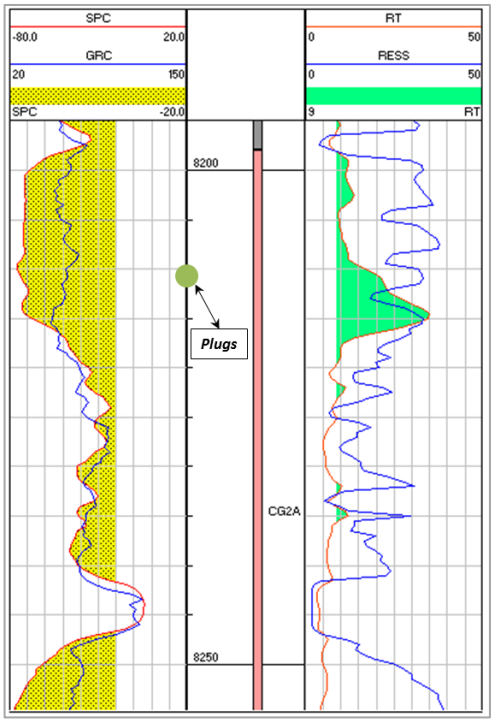
6.1 Selección de corazones

La figura 60 presenta el registro de uno de los pozos con disponibilidad de corazones.

El intervalo seleccionado corresponde a una zona con presencia probada de hidrocarburos abierta a inyección. La figura 61 presenta la tomografía del intervalo seleccionado. Previa a la extracción de *plugs* puede observarse que las condiciones del corazón considerado son adecuadas, encontrándose el mismo en buen estado.

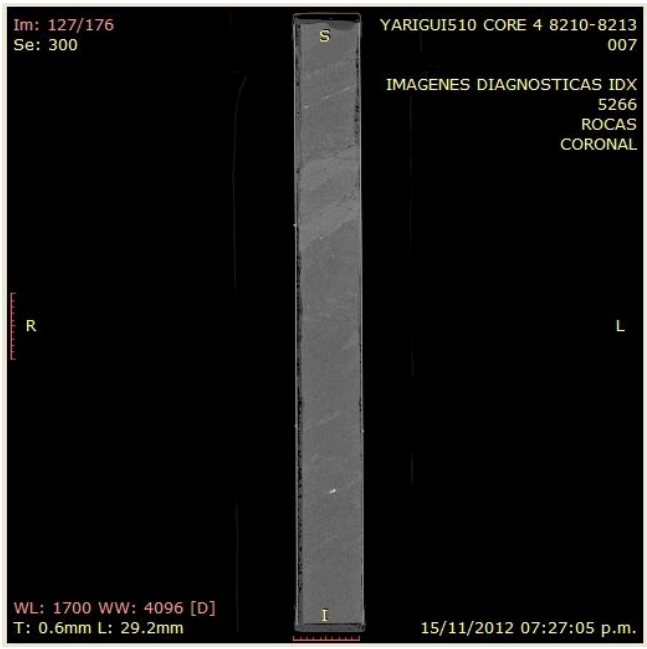
[56] MUÑÓZ, Luis, *et al.* Improving Efficiency in a Mature Waterflood: Balcon Field, Colombia. Paper SPE 150955. 2012.

Figura 60. Análisis de registros.



Fuente: El autor.

Figura 61. Tomografía del intervalo seleccionado.



Fuente: El autor.

Realizada la extracción de *plugs* y medidas las propiedades básicas de las muestras se obtienen los datos presentados en tabla 10.

Tabla 10. Resultados obtenidos en pruebas de análisis básicos para los *plugs* analizados.

Profundidad (ft)	L (cm)	D (cm)	Vol. T (cm^3)	Vol. Poroso (cm^3)	ϕ (%)	K Klinkenberg (mD)	K Aire (mD)
8210.2	6.224	3.805	70.770	16.220	23.6	826	848
8210.4	6.209	3.808	70.710	15.516	22.4	588	620
8211.5	5.642	3.766	62.850	14.567	23.8	1088	1123

Fuente: El autor.

En función de la permeabilidad al aire se establece el arreglo de los *plugs* en el equipo tal como se muestra en la figura 62.

Figura 62. Montaje del equipo con los *plugs* seleccionados.



Fuente: El autor.

6.2 Restauración de mojabilidad

En forma individual para cada *plugs* seleccionado se procede a realizar restauración de mojabilidad, junto con medición de permeabilidad absoluta al agua y efectiva al aceite. La tabla 11 presenta los resultados obtenidos. Es importante

mencionar que los valores de K_{absW} y K_{eo} obtenidos para cada *plug* no mantienen el mismo orden que los de K_{aire}, por lo que no es la muestra de mayor valor de K_{aire} la de mayor valor de K_{absW} y K_{eo}, o viceversa.

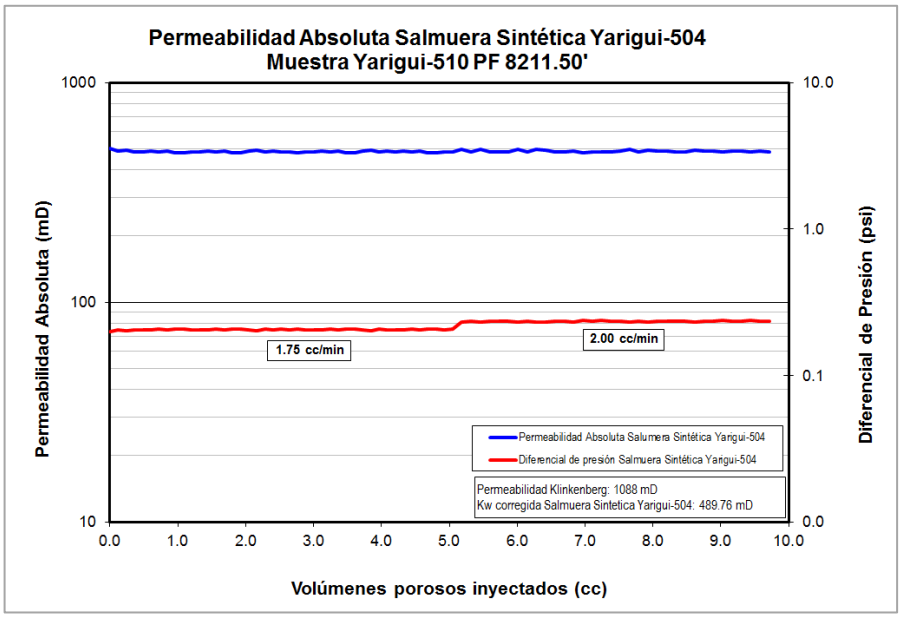
Tabla 11. Resultados obtenidos en pruebas de análisis especiales para los *plugs* analizados.

Profundidad (pies)	Kaire (mD)	K kling (mD)	Kabs W (mD)	Keo (mD)
8211.5	1123.0	1088.0	489.8	367.7
8210.2	848.0	826.0	653.0	518.5
8210.4	620.0	588.0	501.2	462.4

Fuente: El autor.

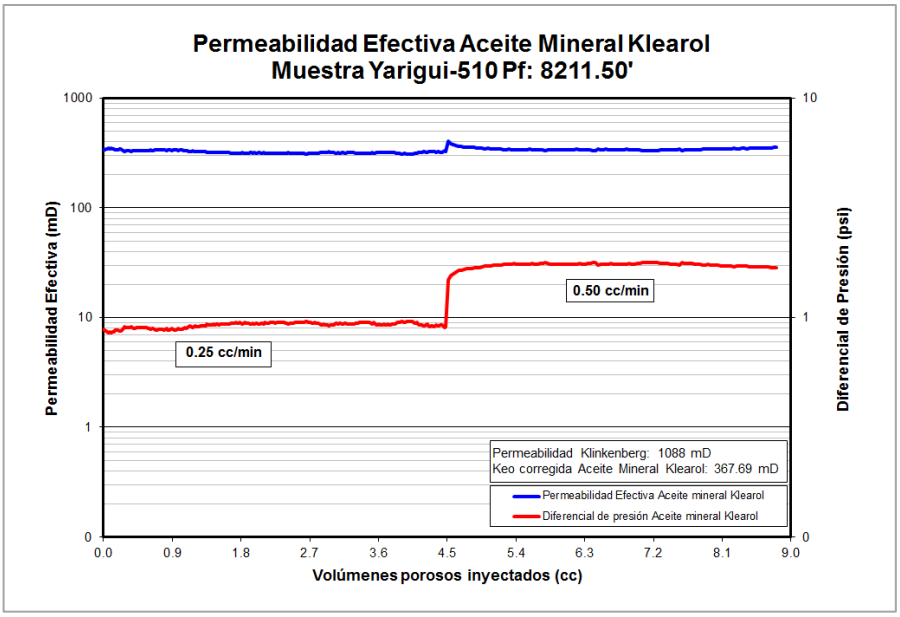
Las figuras 63a y 63b presentan, para la muestra 8211.5', la medición de permeabilidad absoluta al agua y efectiva al aceite.

Figura 63a. Kabs W para la muestra 8211.5'.



Fuente: El autor.

Figura 63b. Keo para la muestra 8211.5'.



Fuente: El autor.

La restauración de mojabilidad se completa con la obtención de la saturación irreducible al agua (S_{wirr}) de cada *plug*. La tabla 12 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 12. Saturación de agua irreducible para cada *plug*.

Profundidad (pies)	Vol. Poroso (cm^3)	Swirr (%)	So (%)
8211.5	14.567	0.36	0.64
8210.2	16.220	0.32	0.68
8210.4	15.516	0.28	0.72

Fuente: El autor.

6.3 Prueba de desplazamiento con *plugs* en paralelo

Ubicados los *plugs* en el montaje, encontrándose a saturación de agua irreducible, se procede a inyectar agua de manera no selectiva, permitiendo que cada uno de ellos tome agua de forma libre, con el objeto de obtener la línea base de producción del arreglo. El anexo B presenta algunas de las respuestas obtenidas

para los diferenciales de presión de cada muestra durante diferentes etapas de la prueba. Durante esta etapa no se presenta recuperación de aceite del *plug* ubicado en el centro del arreglo. La tabla 13 presenta los volúmenes recuperados durante esta etapa.

Tabla 13. Volúmenes recuperados para cada *plug* durante construcción de línea base.

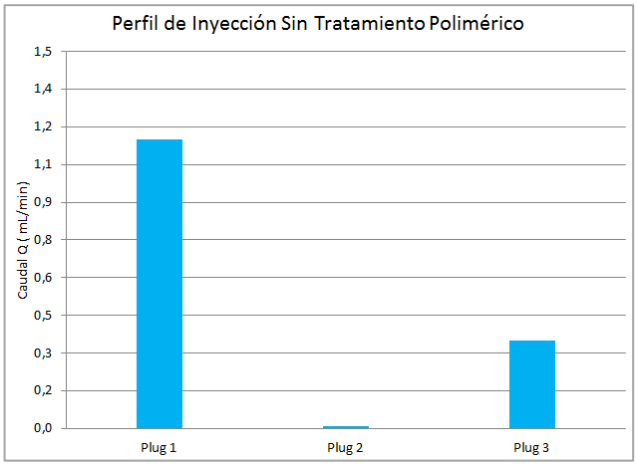
Profundidad (pies)	Vol. Poroso (cm^3)	Vol. Aceite (cm^3)	Vol. Aceite recuperado (cm^3)	% Recobro
8211.5	14.567	9.29	7.50	80.7%
8210.2	16.220	10.95	0.00	0.0%
8210.4	15.516	11.20	4.64	41.4%
TOTAL	**46.303**	**31.44**	**12.14**	**38.6%**

Fuente: El autor.

Al final de esta etapa se procede a medir el perfil de inyección resultante. La figura 64 presenta los resultados obtenidos, en esta se evidencia un claro desbalance entre la cantidad de agua que recibida por los diferentes *plugs*. Mientras el *plug* 1 toma aproximadamente un 76% de la inyección total y el *plug* 3 cerca del 23%, la inyección aceptada por el *plug* 2 es casi despreciable.

Una vez obtenido el perfil de inyección la prueba se continúa inyectando aceite en forma selectiva con el objeto de regresar el arreglo a condiciones de saturación de agua irreducible (S_{wir}) para cada *plug*.

Figura 64. Perfil de inyección durante obtención de línea base (sin tratamiento polimérico).



Fuente: El autor.

La prueba continúa inyectando agua en forma no selectiva hasta tener irrupción en alguno de los *plugs*, allí se procede a inyectar en forma no selectiva 10% del volumen poroso del *plug* canalizado del gel polimérico diseñado previamente. Luego de esperar la formación del gel (*soak time*) se reanuda la inyección de agua no selectiva hasta no extraer más aceite del arreglo. En este punto se mide nuevamente el perfil de inyección. La tabla 14 presenta los volúmenes de aceite recuperados mediante este procedimiento.

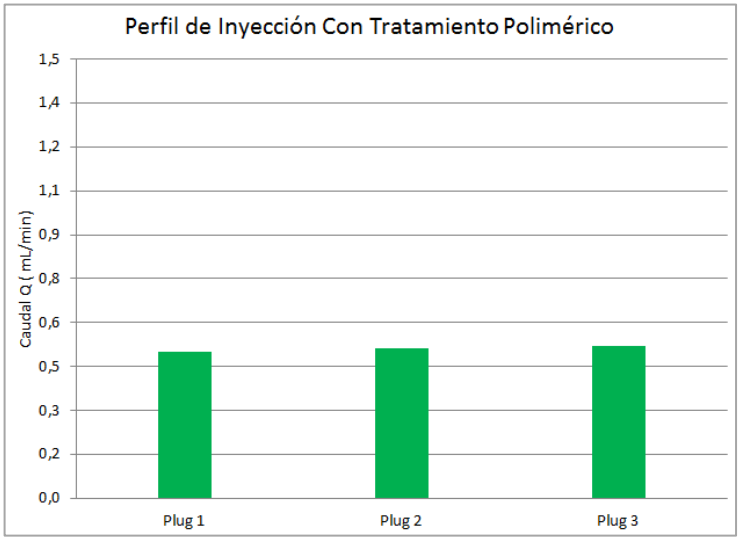
Tabla 14. Volúmenes recuperados para cada *plug* con corrección del perfil de inyección.

Profundidad (pies)	**Vol. Poroso (cm^3)**	**Vol. Aceite (cm^3)**	**Vol. Aceite recuperado (cm^3)**	**% Recobro**
8211.5	14.567	9.29	8.21	88.4%
8210.2	16.220	10.95	7.71	70.4%
8210.4	15.516	11.20	8.60	76.8%
TOTAL	**46.303**	**31.44**	**24.52**	**78.0%**

Fuente: El autor.

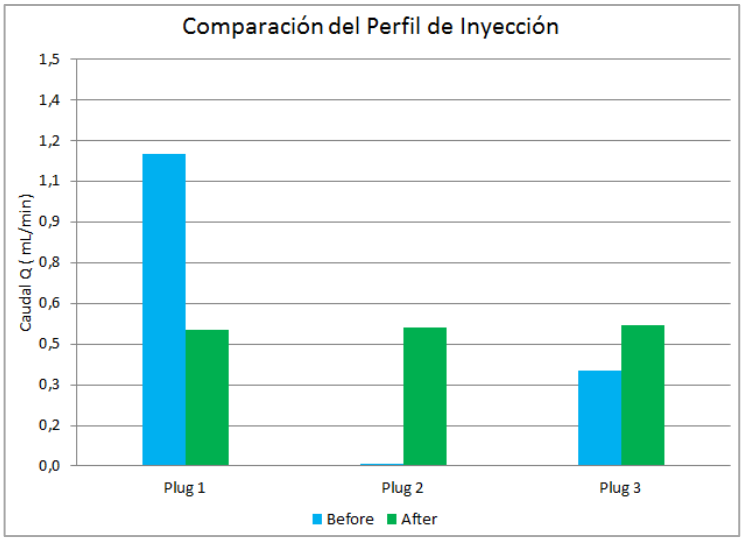
Una comparación de las tablas 13 y 14 evidencia claramente el beneficio volumétrico de la inyección del gel polimérico. El *plug* que en la primera etapa no permitió inyección de agua arrojó un recobro del 70% y, como era de esperar, los otros dos *plugs* mejoraron su barrido. El recobro total del arreglo pasó de cerca del 40% al 78%. La figura 65 presenta el perfil de inyección obtenido al final de esta etapa, la figura 66 es una comparación del antes y el después del perfil de inyección.

Figura 65. Perfil de inyección luego de tratamiento con gel polimérico.



Fuente: El autor.

Figura 66. Perfil de inyección antes y después de tratamiento con gel polimérico.



Fuente: El autor.

6.4 Pérdida de inyectividad

Un gran punto de debate sobre el uso comercial de la tecnología de geles poliméricos es la pérdida de inyectividad generada. La tabla 15 resume los valores obtenidos antes y después de la prueba realizada.

Tabla 15. Volúmenes recuperados para cada *plug* con corrección del perfil de inyección.

Muestra	**Área (cm^2)**	**□P (Psi) - Pre**	**Q $\left(\frac{cm^3}{min}\right)$ - Pre**	**$\frac{\Delta P*A}{Q}\left(\frac{Psi*min}{cm}\right)$ - Pre**	**□P (Psi) - Post**	**Q $\left(\frac{cm^3}{min}\right)$ - Post**	**$\frac{\Delta P*A}{Q}\left(\frac{Psi*min}{cm}\right)$ - Post**
8211.5	11.14	0.37	1.15	3.58	566.37	0.5	12.619
8210.4	11.40	0.19	0.34	6.44	755.77	0.5	16.569

Fuente: El autor.

Es claro que el aumento de las condiciones de inyección necesarias en el sistema se dispara abruptamente luego de realizado el tratamiento polimérico. Las

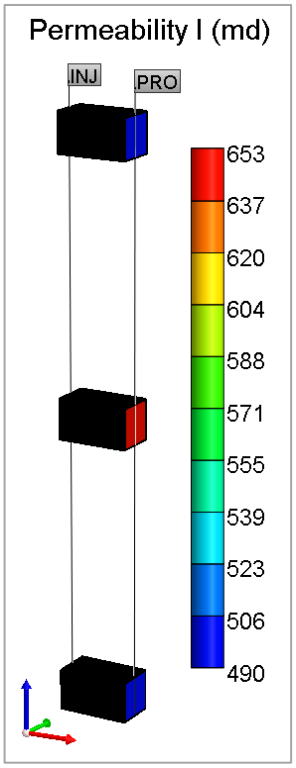
necesidades de capacidad de inyección en superficie deben considerarse al realizar un análisis financiero de este tipo de procedimientos.

7. SIMULACIÓN NUMÉRICA

7.1 Modelo físico e inicialización

El modelo construido en CMG versión 2013.1 se presenta en la figura 67.

Figura 67. Modelo físico 3D.



Fuente: El autor.

Las propiedades de cada intervalo corresponden a los valores reales de los *plugs* involucrados en la prueba de laboratorio. El modelo final fue construido tipo cartesiano con 1000 x 1 x 5 = 500 celdas. Una menor cantidad de celdas, involucrando espaciamientos más grandes, no permitió la convergencia del simulador al involucrar reacción química.

La inicialización del modelo permite establecer qué tan fielmente son representadas las condiciones estáticas del modelo físico. La figura 68 presenta los resultados de inicialización, y los valores medidos de cada parámetro.

Figura 68. Inicialización del modelo de simulación.

	INICIALIZACIÓN DEL MODELO			VALORES MEDIDOS Vol. P (cm^3)	Vol. O (cm^3)	Vol. W (cm^3)
1	Gross formation volume	cm3	2.0522E+02			
2	Formation pore volume	cm3	4.7747E+01	46.303		
3	Aqueous phase volume	cm3	1.9103E+01			14.779
4	Oil phase volume	cm3	2.8644E+01		31.524	
5	Gaseous phase volume	cm3	0.0000E+00			

Fuente: El autor.

De la figura anterior puede concluirse que el modelo estático construido es adecuado para representar las condiciones reales.

7.2 Modelo químico

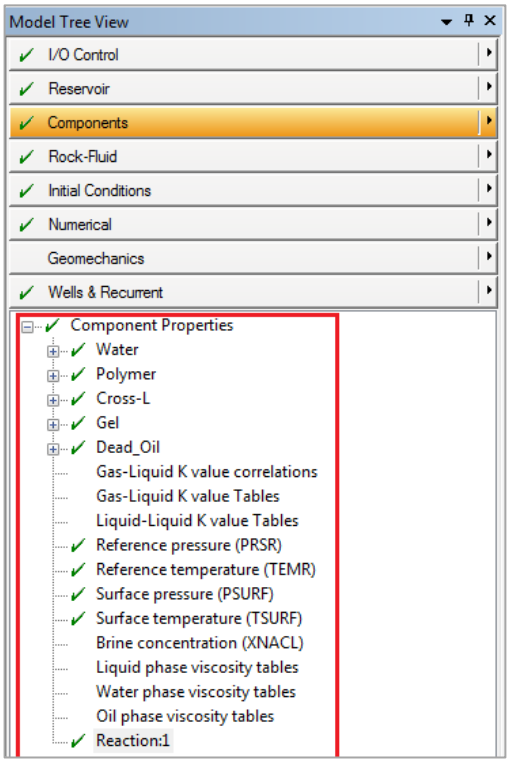
Durante esta investigación se obtuvo como formulación más adecuada para las condiciones fluido – fluido bajo estudio la mezcla 4000[poly]-20:1-4000[NaCl], para un polímero con peso molecular entre 8 & 10 M Dalton, a una temperatura de 67°C (152.6°f). Se encontró además que la velocidad de la reacción (en función del Ln(G')) varía con el tiempo, desde el momento en que se produce la mezcla hasta cuando no sucede más. Los datos anteriores fueron comprobados mediante análisis reológicos, ultravioleta y una extensa cantidad de pruebas tipo Sydansk, las cuales son las únicas normalmente utilizadas para el diseño comercial de aplicaciones.

El software utilizado para el modelamiento de la prueba fluido – roca (CMG), también desarrollada en este estudio, permite involucrar diferentes parámetros de reacción química en un modelo de flujo de fluidos. La figura 69 presenta la ventana "*Components*", en donde se definen las características de los

componentes a utilizar en el modelo. Bajo el esquema planteado por el software, la opción más realista para considerar reacciones químicas es la definición de un componente por cada reactivo y / o producto involucrado en la reacción particular. En la misma figura se observan los componentes "*Polymer*", "*Cross-L*" y "*Gel*", definidos en el modelo utilizado.

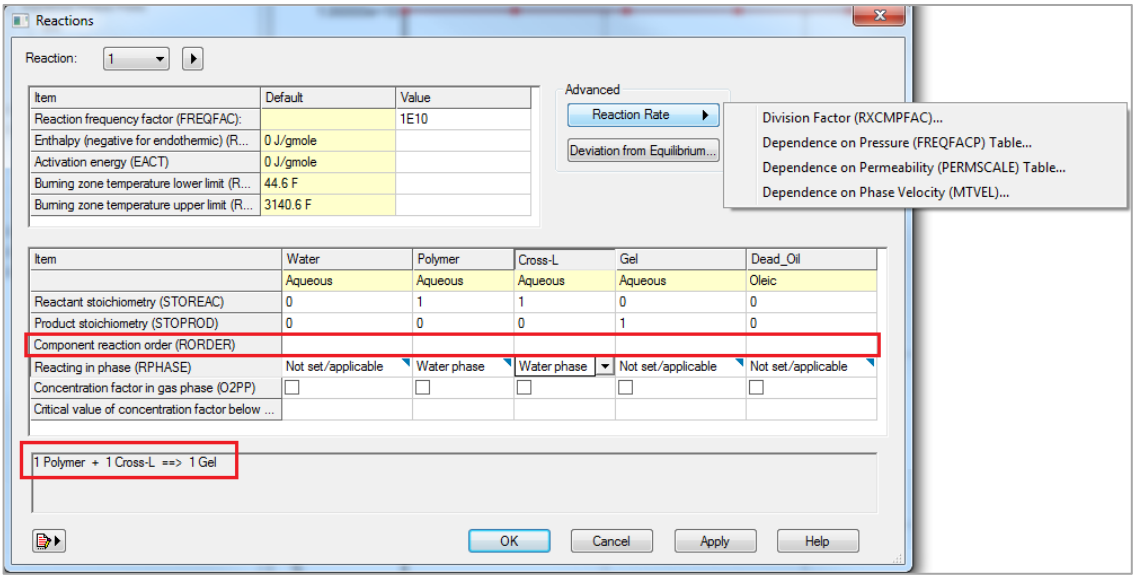
La figura 70 presenta el despliegue de las opciones disponibles para modelar cada reacción considerada. Es importante resaltar que en este estudio se verificó el orden de la reacción de formación de geles poliméricos como de seudo-primer orden, la cual no es una opción disponible en ningún software comercial de simulación de yacimientos, y el cual es un factor fundamental.

Figura 69. Ventana de componentes en CMG.



Fuente: El autor.

Figura 70. Ventana de reacciones químicas en CMG.



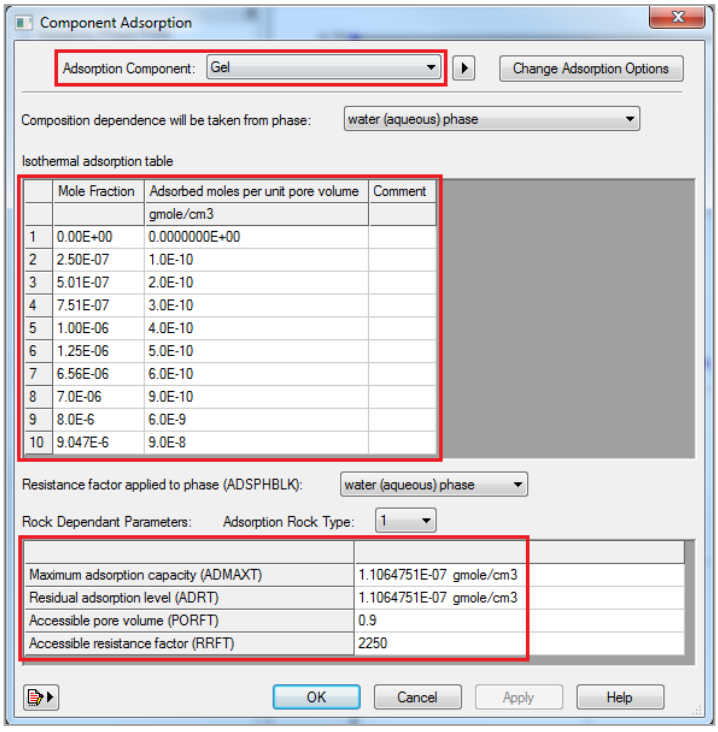
Fuente: El autor.

No pudiendo involucrar mecanísticamente el orden de la reacción en el modelamiento, un factor que puede utilizarse es el factor de frecuencia de reacción, el cual se utiliza para este caso como un parámetro de sensibilidad.

La figura 71 presenta la ventana de adsorción en CMG, la cual es muy utilizada para el modelamiento de procesos que involucran químicos, dada la tendencia de los mimos a adsorberse. Es posible definir el componente para el cual se establecen los parámetros, así como definir los factores de resistencia residual y volumen poroso inaccesible, claves en el modelamiento de polímeros.

Es importante mencionar que buena parte de la simulación del proceso químico se centra en el uso de herramientas tradicionales tales como las curvas de permeabilidad relativa, o, para el caso de polímeros, los multiplicadores de permeabilidad.

Figura 71. Ventana de adsorción de componentes en CMG.



Fuente: El autor.

7.3 Ajuste numérico

Dado que las pruebas de desplazamiento con *plugs* en paralelo son raramente llevadas a cabo para analizar el comportamiento de yacimientos, no se reportan en la literatura ajustes numéricos de las mismas. Aunque el ajuste numérico de pruebas de desplazamiento se centra en representar la tasa de aceite producido, en este caso es igual, o tal vez más importante, representar la tasa de inyección en cada núcleo. La tabla 16 presenta los datos obtenidos durante el procedimiento experimental.

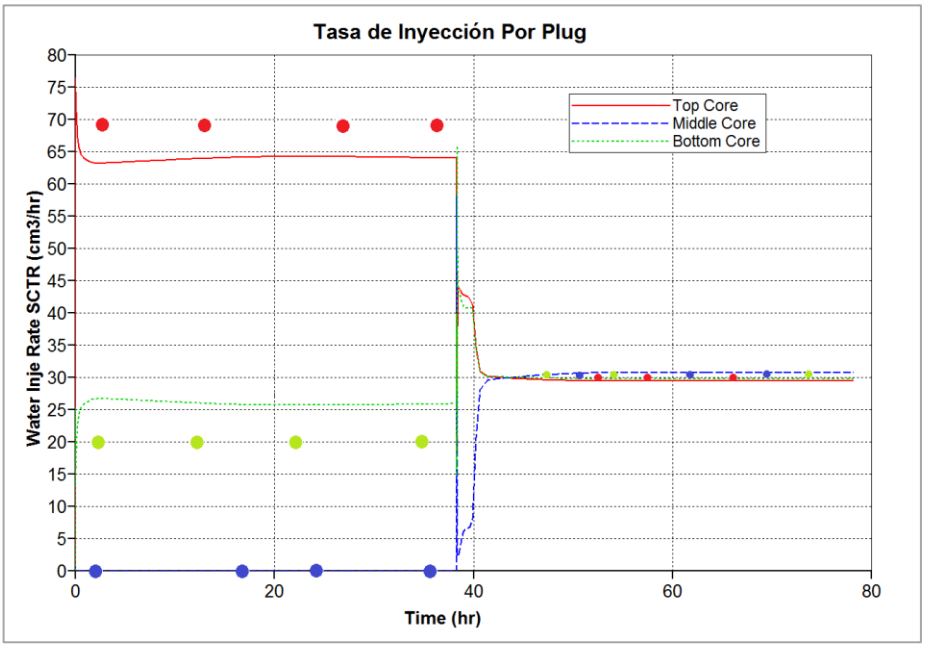
Tabla 16. Datos experimentales a modelar numéricamente.

Muestra	Q $\left(\frac{cm^3}{min}\right)$ – Pre	Oil Cum (cm^3) – Pre	Q $\left(\frac{cm^3}{min}\right)$ - Post	Oil Cum (cm^3) – Post
8211.5	1.15	7.50	0.50	8.21
8210.2		0.00	0.51	7.71
8210.4	0.34	4.64	0.52	8.60

Fuente: El autor.

Bajo las condiciones de modelamiento químico que permite CMG, el ajuste post inyección de gel resulta dispendioso, sin embargo, es posible utilizar las opciones disponibles para lograr un ajuste razonable. La figura 72 presenta el ajuste de la tasa de inyección antes y después del tratamiento.

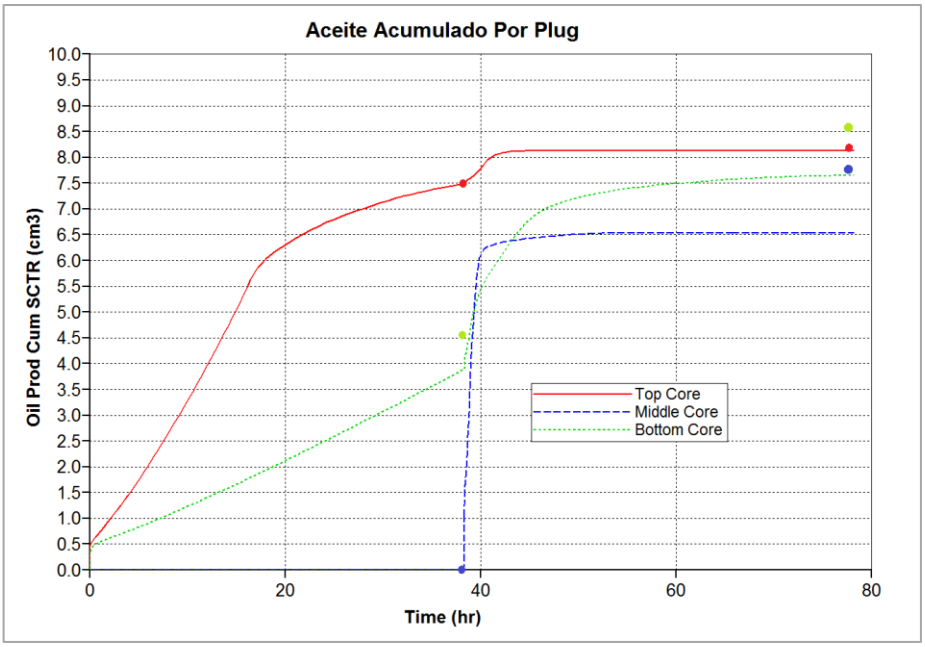
Figura 72. Ajuste de la tasa de inyección pre y post tratamiento polimérico.



Fuente: El autor.

La figura 73 presenta el ajuste del aceite acumulado antes y después del tratamiento con gel polimérico.

Figura 73. Ajuste del aceite acumulado sin y con tratamiento polimérico.



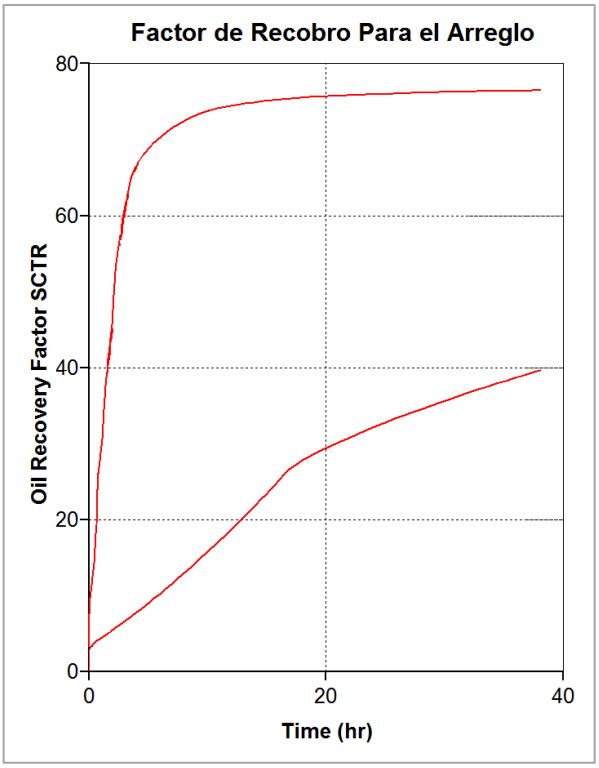
Fuente: El autor.

A pesar de no contar con la trayectoria de producción de cada *plug*, debido a que la prueba fue diseñada principalmente para verificar el efecto sobre el perfil de inyección, el modelo numérico comercial permite representar en forma aceptable los volúmenes acumulados por *plug*, además de las tasas de inyección.

7.4 Casos de análisis

El primer factor importante determinar es si el modelo representa el beneficio propuesto por la prueba experimental para la tecnología. La figura 74 presenta el factor de recobro para todo el arreglo. Es claro que el caso utilizando geles poliméricos promete un beneficio muy superior a una línea base *waterflooding* normal, además de aceite acumulado en términos de aceleración de la producción. Es adecuado aclarar que dado que la prueba se realizó de manera consecutiva, tal como se presenta en las figuras 72 y 73, los resultados de la figura 74 deben trasladarse en el tiempo para representar adecuadamente el efecto de la tecnología sobre la aceleración de la producción.

Figura 74. Factor de recobro para todo el arreglo.



Fuente: El autor.

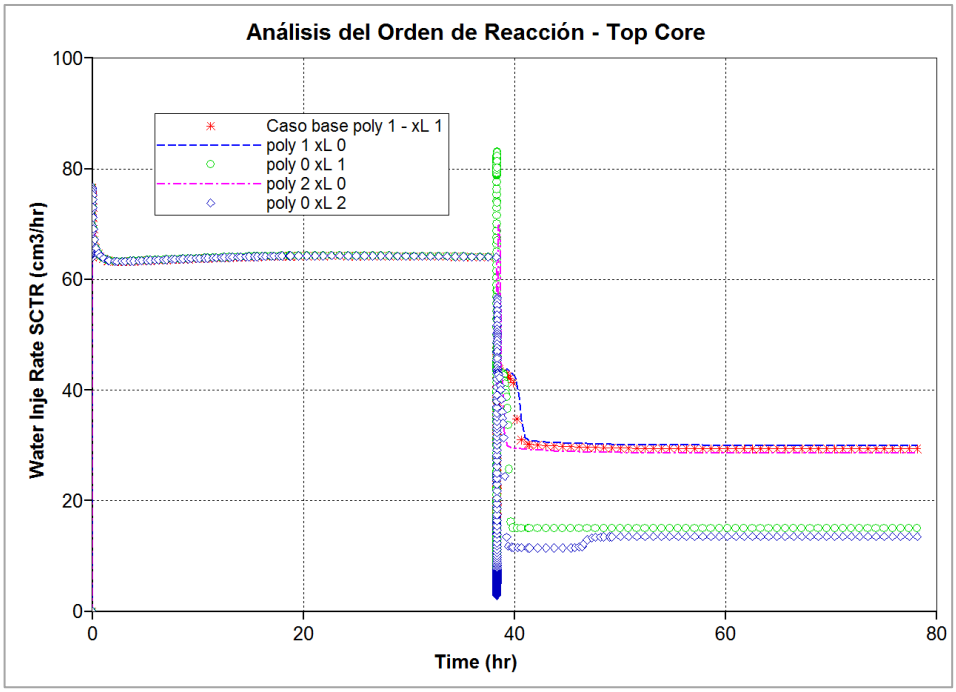
El modelo construido puede utilizarse para confirmar o descartar los mecanismos supuestos de funcionamiento de los geles poliméricos. La tabla 17 presenta casos diseñados para analizar el orden de la reacción, la figura 75 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 17. Sensibilidad al orden de reacción de cada componente.

	Orden Poly	**Orden *x-Linker***	**Orden de la Reacción**
Caso base	1	1	2
Caso 1	1	0	1
Caso 2	0	1	1
Caso 3	2	0	2
Caso 4	0	2	2

Fuente: El autor.

Figura 75. Análisis del orden de reacción.



Fuente: El autor.

El caso base de ajuste se muestra casi igual que los casos en que orden del polímero gobierna en la velocidad de la reacción. Cuando el orden del *x-linker* es el de mayor proporción la reacción tiene lugar más rápidamente, causando mayor pérdida de inyectividad. Lo anterior confirma que la velocidad de la reacción, como es de esperar, está dominada por el reactivo límite.

La figura 75 permite también concluir sobre el modelo químico utilizado. El mismo no permite utilizar orden 0 para la reacción, es decir, la velocidad de la misma no es posible gobernarla directamente por la constante presente en la ecuación de velocidad de reacción (ecuación 2). Lo anterior impide aislar la velocidad de la reacción de la concentración de los reactivos, lo cual no es real para este caso, dado que en una reacción de formación de gel la concentración permanece constante, caracterizándose así como de seudo-orden, tal como fue encontrado en la parte experimental de este estudio.

$$\text{Velocidad} = cte[poly]^m[x - linker]^n \ldots\ldots\ldots\ldots ecuación\ (2)$$

Otro análisis interesante es el efecto de la variación del factor de frecuencia (*cte* en la ecuación (2)) sobre la ocurrencia de la reacción. La tabla 18 presenta los casos planteados.

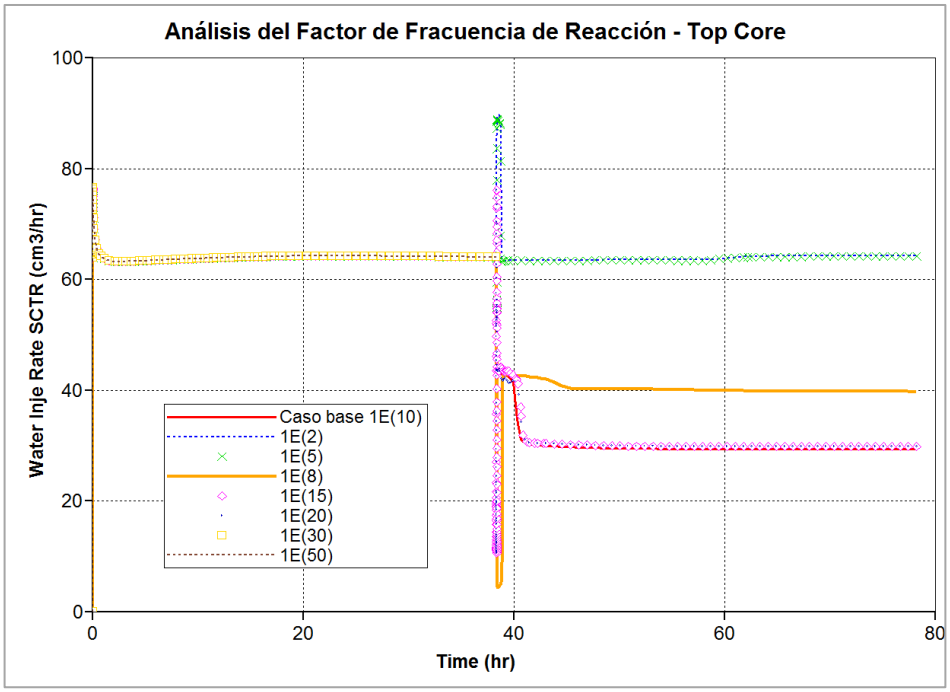
Tabla 18. Sensibilidad al factor de frecuencia de reacción.

	Factor de frecuencia (FREQFAC)
Caso base	1 E(10)
Caso 1	1 E(2)
Caso 2	1 E(5)
Caso 3	1 E(8)
Caso 4	1 E(15)
Caso 5	1 E(20)
Caso 6	1 E(30)
Caso 7	1 E(50)

Fuente: El autor.

La figura 76 presenta los resultados obtenidos, en ella es claro que el factor de frecuencia de formación, manteniendo el orden de reacción constante, puede por sí sólo variar la formación de gel para realizar un ajuste. Es de notar que al seguir aumentando FREQFAC por encima del valor utilizado para ajustar (1 E(10)), la reacción no continuó dándose, lo cual es un efecto directo de la masa de reactivo límite considerada en el modelo.

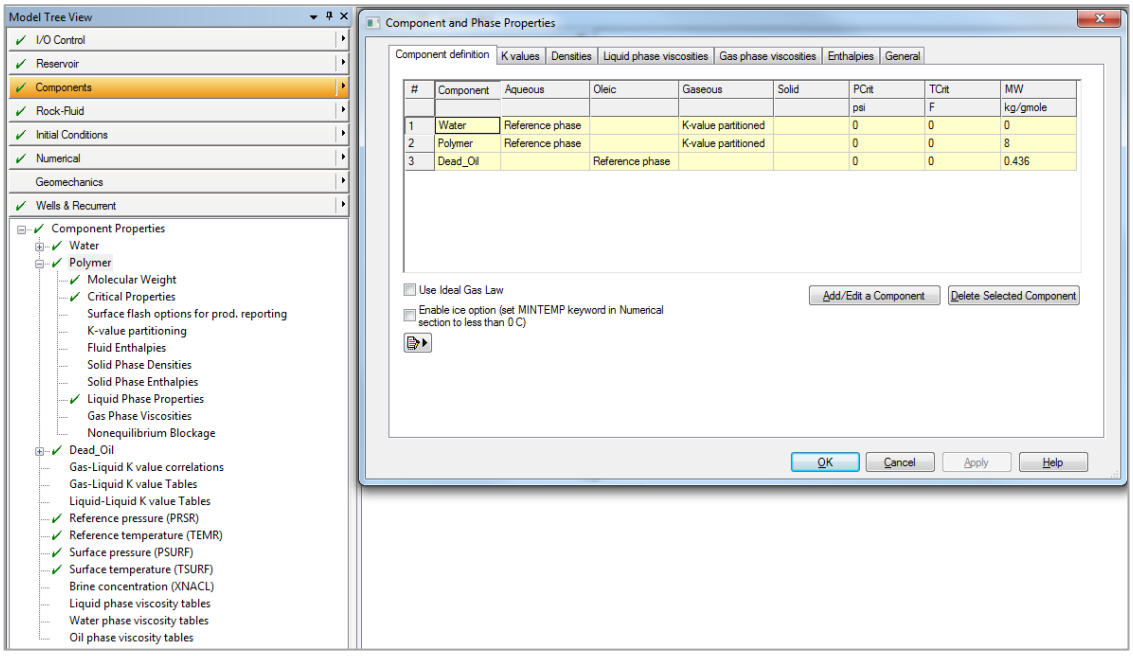
Figura 76. Análisis del factor de frecuencia de reacción.



Fuente: El autor.

El análisis realizado durante este capítulo, así como la investigación en general, indican que la reacción de formación de gel polimérico no corresponde exactamente a reacciones químicas que deban modelarse mediante los conceptos de cinética de reacción clásicos de las mismas, a saber, orden de reacción y factor de frecuencia de reacción. Para el caso de geles poliméricos, al no cambiar la concentración de los reactivos (polímero y *x-linker*) con el tiempo, se presenta una seudo – reacción, lo cual puede permitir el modelamiento de los fenómenos por ella generados en yacimientos mediante simulación convencional. La figura 77 presenta el modelo construido utilizando únicamente el componente "*Polymer*", sin involucrar reacción química.

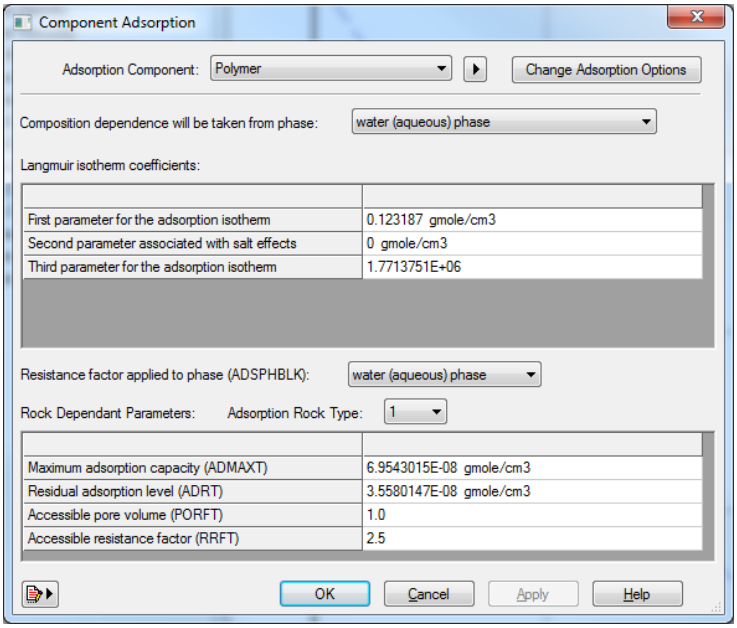
Figura 77. Modelo de simulación convencional para ajuste de prueba con *plugs* en paralelo.



Fuente: El autor.

El modelo construido con sólo polímero requiere condiciones de absorción diferentes a las consideradas en el caso anterior, las mismas se muestran en la figura 78. Dadas las condiciones de absorción diferentes para gel y gel polimérico se considera aquí una factor de resistencia residual menor, así como que todo el volumen poroso es accesible para el polímero seleccionado, lo cual puede considerarse correcto dado el bajo peso molecular del mismo. Tal como se realiza en simulación convencional, se aplican multiplicadores de permeabilidad para realizar el ajuste. Las características físicas del modelo permanecen igual a las descritas anteriormente para simular el caso de ajuste con reacción química.

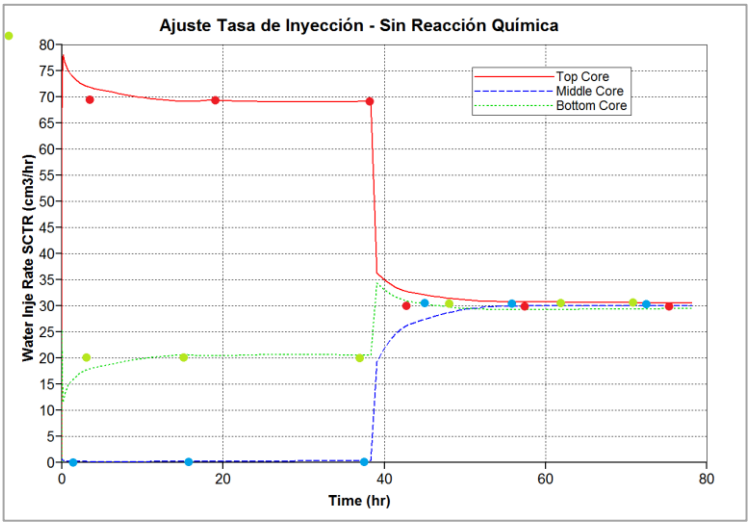
Figura 78. Modelo de simulación convencional para ajuste de prueba con *plugs* en paralelo.



Fuente: El autor.

La figura 79 presenta el ajuste del perfil de inyección con un modelo tradicional de simulación.

Figura 79. Ajuste de tasa de inyección sin reacción química.



Fuente: El autor.

La gráfica anterior permite apreciar un mejor ajuste respecto al realizado utilizando mediante reacción química, además, el proceso de construcción del modelo y la cantidad de información necesaria son mucho menores en este caso.

CONCLUSIONES

- El análisis de las pruebas tipo Sydansk permiten determinar la formación de gel polimérico bajo estudio para un conjunto de propiedades específicas, sin embargo, no arroja respuesta clara sobre el comportamiento del mismo ante cualquier variación de las propiedades. Si bien el comportamiento inicial parece acorde al aumento de la concentración del polímero o del *x-linker*, esto no se cumple para todos los casos; la reacción nunca tiende a una estabilización en la cual el gel polimérico mantenga su consistencia, o se haga más fuerte; por el contrario, la variación de propiedades por fuera de un rango no determinado, resulta siempre en pérdida de la consistencia del mismo. Al variar las condiciones de formulación en una dirección específica, una sola variable en contante disminución o aumento, la consistencia del gel no mantiene una única tendencia. Lo anterior señala que una vez formado el gel continúan dándose interacciones que pueden desestabilizar el mismo, y hace que los mecanismos de funcionamiento no sean claros.

- Existen riesgos operacionales claros en la tecnología estudiada, los más importantes son la posible no formación del gel a temperaturas bajas (cercanas al ambiente), así como la formación acelerada del mismo cuando la temperatura aumenta. La pérdida considerable de inyectividad en la formación es una posible consecuencia de lo anterior; tal como se observó en laboratorio. Aunque los resultados no son directamente escalables a campo, es necesario considerar esta variable en el diseño de aplicaciones comerciales.

- La salinidad equivalente del agua de preparación no es relevante para la formación de gel en tiempos cortos, esta cobra importancia para la estabilidad del mismo, y por lo tanto para la durabilidad en el tiempo de un tratamiento real. La concentración del polímero responde al mismo principio, altos valores

de esta aportan más a la duración en el tiempo del gel que a la formación del mismo y la τ alcanzada inicialmente. Pruebas de larga duración, estilo Sydansk, son importantes para determinar la estabilidad del gel en el tiempo; sin embargo, en las mismas debe evidenciarse que τ se alcance rápidamente, de lo contrario el tiempo de remojo necesario puede ser demasiado largo, y el tratamiento económicamente inviable.

- En general, la presencia de iones [Ca^{++}] y [Mg^{++}] afecta negativamente la formación de gel polimérico, siendo más marcada la influencia del primero de ellos. En este estudio no se observó efecto del ion [Fe^{++}], lo anterior puede deberse al diseño experimental propuesto, siendo clara su influencia negativa sobre la HPAM. El enfoque cualitativo de los análisis tipo Sydansk se ve favorecido en presencia de iones divalentes, la respuesta de los análisis con UV no es tan clara en estos casos, por lo que su utilización en este tipo de aguas puede no ser la mejor opción.

- Se obtuvo en este estudio la velocidad de reacción de una formulación de gel polimérico específica, mediante la utilización de los módulos de almacenamiento y pérdida, identificando comportamientos de seudo - orden. Dado el exceso de HPAM en las soluciones, la estequiometría de las mismas toma poco peso. Al identificarse la formación de gel polimérico con comportamiento de seudo - orden, los conceptos de cinética de reacción no son los incorporados en los software de modelamiento numérico, por lo anterior puede no ser necesario el uso de reacciones químicas para modelar este tipo de procesos.

- Las pruebas fluido roca diseñadas y ejecutas en este estudio demuestran un claro beneficio técnico al utilizar geles poliméricos para mejorar el perfil de inyección. Los volúmenes de aceite producidos de cada *plug* evidencian fuerte mejora en el factor de recobro final, sin embargo, dado el volumen de

gel polimérico considerado en este tipo de tratamientos, 10% del volumen poroso de la arena canalizada, toda aplicación en campo debe estar sujeta a un análisis económico riguroso.

RECOMENDACIONES

- Es importante continuar investigación que permita mejorar el conocimiento sobre el efecto de las condiciones dinámicas de pozo y yacimientos sobre la formación del gel polimérico. Factores como esfuerzos de cizalla, turbulencia en tuberías y otras no han sido estudiados para esta tecnología.

- Dada la presencia de múltiples procesos EOR en áreas cercanas de un mismo yacimiento, se recomienda investigar en más detalle el comportamiento de geles poliméricos en función de la temperatura. Esta variable demostró en este estudio ser de mucha influencia en el comportamiento de la velocidad de reacción. Las velocidades aquí obtenidas obedecen a un conjunto de propiedades dadas, incluyendo temperatura constante.

- Se recomienda profundizar la relación entre pruebas Sydansk, ultravioleta y reológicas, con el objeto de obtener una herramienta cuantitativa para el diseño de geles poliméricos

- Dada la imposibilidad de utilizar la variación de concentración de polímero y *x-linker* para investigar el orden de la reacción bajo estudio, se recomienda utilizar técnicas, como resonancia magnética nuclear (MNR) para profundizar este tema.

- En función de los resultados aquí obtenidos, se recomienda profundizar el conocimiento sobre simulación numérica en esta tecnología.

- Se recomienda realizar estudios que aclaren la relación entre el uso de geles poliméricos y las temas tecnologías de recobro mejorado, en particular de recobro químico, con el objeto de potencializar los posibles beneficios.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations. RP 63. 1 Ed. Washington, USA. 1990. 86 p.
2. BJØRSVIK, M; HØILAND, H Y SKAUGE, Arne. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Formation of colloidal dispersion gels from aqueous polyacrylamide solutions. Volume 317, 20 marzo, 2008. p. 504 - 511.
3. CHANG, H, et al. Advances in Polymer Flooding and Alkaline/Surfactant/Polymer Processes as Developed and Applied in the People´s Republic of China. En: Journal of Petroleum Technology. Febrero, 2006. p. 84-89.
4. CMG (Computer Modelling Group). Advanced Processes & Thermal Reservoir Simulator (STARS). Version 2013.
5. DELGADILLO, Cluadia. Evaluación de la viabilidad técnica de implementación de procesos de inyección de geles. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2010.
6. EHRLICH, R & WYGAL, R. Interaction of Crude Oil and Rock Properties with the Recovery of Oil by Caustic Waterflooding. En: Society of Petroleum Engineers Journal. Agosto, 1977. p. 263-279.
7. GREEN, Don & WILLHITE, Paul. Enhanced Oil Recovery. 2 ed. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1998. 1 p. ISBN 1-55563-077-4.
8. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA, María del Pilar. 5 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2010. 613 p. ISBN 978-607-15-0291-9.
9. HIEMENZ, Paul & RAJAGOPALAN, Raj. Principles of Colloid and Surface Chemistry. 3 ed. New York: Marcel Dekker, 1997. p. 1. ISBN 0-8247-9397-8.

10. IBARRA, Javier. Evaluación de la implementación de geles mediante simulación numérica. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2010.
11. JAMALOEI, Benyamin. Insight into the Chemistry of Surfactant-Based Enhanced Oil Recovery Processes. En: Recent Patents on Chemical Engineering. 2009. vol. 2, no. 1, p. 1–10.
12. JOHNSON, J. Status of Caustic and Emulsion Methods. En: Journal of Petroleum Technology. Enero, 1976. p. 85-92.
13. KLAVENESS, Thore & Ruoff, Peter. Kinetics of the Cross-linking of Polyacrylamide with Cr(III). Analysis of Possible Mechanisms. En: Journal of Physical Chemistry. Junio, 1994. vol. 98, no. 40, p. 10119–10123.
14. KLAVENESS, Thore; Ruoff, Peter & Kolnes, Jostein. Kinetics of the Cross-linking of Polyacrylamide with Cr(III). Rheological Measurements of the Gelation. En: Journal of Physical Chemistry. Enero, 1995. vol. 99, no. 20, p. 8255 – 8259.
15. LAKE, Larry. Enhancel Oil Recovery. 1 ed. Austin, Texas: Prentice Hall, 1989. 314 p. ISBN 0-13-281601-6.
16. LOCKHART, Thomas. Chemical Properties of Chromium/Polyacrilamide Gels. Paper SPE 20998. 1994.
17. MUÑÓZ, Luis, et al. Improving Efficiency in a Mature Waterflood: Balcon Field, Colombia. Paper SPE 150955. 2012.
18. NORMAN, Chuck, et al. A Review of Over 100 Polymer Gel Injection Well Conformance Treatments in Argentina and Venezuela: Design, Field Implementation and Evaluation. Paper SPE 101781. 2006.
19. OSTROFF, Anton. 1 ed. Houston: Prentice-Hall, 1979. 394 p. ISBN 978-0915567720.
20. POPE, Gary. Recent Developments and Remaining Challenges of Enhanced Oil Recovery. En: Journal of Petroleum Technology. Julio, 2011.
21. SHENG, James. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice. 1 ed.: Elsevier, 2011. 4 p. ISBN 978-1-85617-745-0.

22. SORBIE, K. Polymer-Improved Oil Recovery. 1 ed. London, U.K.: Blackie & Son Ltd, 1991. 359 p. ISBN 0-8493-7137-6.
23. SYDANSK, Robert & ROMERO-ZERÓN, Laura. Reservoir Conformance Improvement. 1 ed. Richardson, Texas.: Society of Petroleum Engineers, 2011. 3 p. ISBN 978-1-55563-302-8.
24. SYDANSK, Robert. & MOORE P. Production Responses in Wyoming's Big Horn Basin Resulting From Application of Acrylamide-Polymer/Cr(III)-Carboxilate Gels. Paper SPE 21894. 1990.
25. TERRY, Ronald, et al. Correlation of Gelation Times for Polymer Solutions Used as Sweep Improvement Agents. Paper SPE 8419. 1981.
26. UNITED STATES PATENT OFFICE. Conformance Improvement in a Subterranean Hydrocarbon-Bearing Formation Using Polymer Gel. Inventor: R. SYDANSK and P. ARGABRIGHT. Int. CL.: E21b 33/138. Fecha de solicitud: 27, enero, 1986. US PATENT 4,683,949. 4, agosto, 1987.
27. UNITED STATES PATENT OFFICE. Geling Agents, Gels and Methods for Forming Gels. Inventor: D. GOETZ. CL.: 252-316. Fecha de solicitud: 30, julio, 1964. US PATENT 3,383,307. 14, mayo, 1968.
28. UNITED STATES PATENT OFFICE. Recovery of Petroleum from Oil-Bearing Sands. Inventor: H. ATKINSON. Fecha de solicitud: 14, abril, 1926. US PATENT 1,651,311. 29, noviembre, 1927.
29. UNITED STATES PATENT OFFICE. Subterranean Formation Permeability Correction. Inventor: J. GALL. Int. CL.: E21b 33/138, E21b 43/22. Fecha de solicitud: 3, enero, 1972. US PATENT 3,762,476. 2, octubre, 1973.
30. VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE QUÍMICA, INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA. 9-12, OCTUBRE, 2012: La Habana, Cuba. PACHÓN CONTRERAS, Zarith; VILLAR GARCÍA, Álvaro y ROA, Manuel. Análisis de la cinética de gelificación de geles de dispersión coloidal utilizados en procesos de recobro mejorado de petróleo mediante sus propiedades viscoelásticas.

31. WOUTERLOOD, Carlos; FALCIGNO, Esteban Y NORMAN, Chuck. Metodología y Resultados de Proyectos de Inyección de Geles para Incrementar la Recuperación en un Reservorio Heterogéneo y Multicapa de la Cuenca Neuquina de Argentina. INGEPET. 2002.

ANEXO A. RESULTADOS DE ANÁLISIS TIPO SYDANSK POLÍMEROS 1 Y 2

Tabla 1A. Resultados de análisis tipo Sydansk para P2 a 4.000 PPM.

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
4000	20:1	4000	22 (72°f)	1[s]	7[g]	7[g]	7[g]	S	2aaa072
4000	20:1	4000	52 (126°f)	3[g]	S	S	S	S	2aaa126
4000	20:1	4000	67 (153°f)	S	[S]	S	S	S	2aaa153
4000	20:1	4000	75 (167°f)	S	S	S	S	S	2aaa167
4000	20:1	8000	22 (72°f)	1[g]	8[e]	9[e]	9[e]	9[e]	2aab072
4000	20:1	8000	52 (126°f)	8[g]	S	S	S	S	2aab126
4000	20:1	8000	67 (153°f)	1[s]	S	S	S	S	2aab153
4000	20:1	8000	75 (167°f)	1[s]	S	S	S	S	2aab167
4000	20:1	16000	22 (72°f)	2[n]	6[e]	S	S	S	2aac072
4000	20:1	16000	52 (126°f)	S	S	S	S	S	2aac126
4000	20:1	16000	67 (153°f)	S	S	S	S	S	2aac153
4000	20:1	16000	75 (167°f)	S	S	S	S	S	2aac167
4000	40:1	4000	22 (72°f)	1[s]	6[g]	7[g]	7[g]	7[g]	2aba072
4000	40:1	4000	52 (126°f)	7[g]	5[g]	7[n]	7[g]	7[g]	2aba126
4000	40:1	4000	67 (153°f)	7[g]	6[g]	7[g]	7[g]	7[g]	2aba153
4000	40:1	4000	75 (167°f)	6[g]	7[g]	7[g]	8[g]	8[g]	2aba167
4000	40:1	8000	22 (72°f)	1[s]	7[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2abb072
4000	40:1	8000	52 (126°f)	7[g]	8[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2abb126
4000	40:1	8000	67 (153°f)	7[g]	7[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2abb153
4000	40:1	8000	75 (167°f)	7[g]	7[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2abb167
4000	40:1	16000	22 (72°f)	2[n]	7[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2abc072
4000	40:1	16000	52 (126°f)	8[e]	8[g]	5[g]	[5g]	5[g]	2abc126
4000	40:1	16000	67 (153°f)	8[g]	7[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2abc153
4000	40:1	16000	75 (167°f)	8[e]	5[g]	5[g]	7[g]	5[g]	2abc167
4000	80:1	4000	22 (72°f)	1[s]	5[s]	5[g]	5[g]	6[g]	2aca072
4000	80:1	4000	52 (126°f)	6[g]	6[g]	7[g]	7[g]	7[g]	2aca126
4000	80:1	4000	67 (153°f)	6[g]	6[g]	7[g]	8[g]	8[g]	2aca153
4000	80:1	4000	75 (167°f)	6[s]	5[g]	6[g]	7[g]	7[g]	2aca167

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
4000	80:1	8000	22 (72°f)	1[s]	6[g]	6[g]	6[g]	6[g]	2acb072
4000	80:1	8000	52 (126°f)	7[g]	6[g]	6[g]	6[g]	6[g]	2acb126
4000	80:1	8000	67 (153°f)	6[g]	7[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2acb153
4000	80:1	8000	75 (167°f)	7[g]	7[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2acb167
4000	80:1	16000	22 (72°f)	2[n]	6[g]	7[g]	7[g]	7[g]	2acc072
4000	80:1	16000	52 (126°f)	7[g]	7[g]	7[g]	7[g]	5[g]	2acc126
4000	80:1	16000	67 (153°f)	7[g]	7[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2acc153
4000	80:1	16000	75 (167°f)	7[g]	7[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2acc167

Fuente: El autor.

Tabla 2A. Resultados de análisis tipo Sydansk para P2 a 6.000 PPM.

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
6000	20:1	4000	22 (72°f)	7[g]	9[g]	9[g]	9[g]	10[e]	2baa072
6000	20:1	4000	52 (126°f)	10[e]	S	S	S	S	2baa126
6000	20:1	4000	67 (153°f)	S	S	S	S	S	2baa153
6000	20:1	4000	75 (167°f)	10[e]	S	S	S	S	2baa167
6000	20:1	8000	22 (72°f)	7[g]	9[g]	9[g]	9[g]	S	2bab072
6000	20:1	8000	52 (126°f)	10[e]	S	S	S	S	2bab126
6000	20:1	8000	67 (153°f)	10[e]	S	S	S	S	2bab153
6000	20:1	8000	75 (167°f)	S	S	S	S	S	2bab167
6000	20:1	16000	22 (72°f)	7[g]	9[g]	9[g]	10[e]	10[e]	2bac072
6000	20:1	16000	52 (126°f)	10[e]	S	S	S	S	2bac126
6000	20:1	16000	67 (153°f)	10[e]	S	S	S	S	2bac153
6000	20:1	16000	75 (167°f)	S	S	S	S	S	2bac167
6000	40:1	4000	22 (72°f)	5[g]	8[g]	8[g]	9[g]	9[g]	2bba072
6000	40:1	4000	52 (126°f)	9[g]	8[g]	8[g]	9[g]	9[g]	2bba126
6000	40:1	4000	67 (153°f)	9[g]	8[g]	8[g]	S	S	2bba153
6000	40:1	4000	75 (167°f)	8[g]	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2bba167

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
6000	40:1	8000	22 (72°f)	7[g]	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2bbb072
6000	40:1	8000	52 (126°f)	9[e]	9[g]	8[g]	9[g]	9[g]	2bbb126
6000	40:1	8000	67 (153°f)	9[g]	8[g]	8[g]	9[g]	9[g]	2bbb153
6000	40:1	8000	75 (167°f)	9[g]	9[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2bbb167
6000	40:1	16000	22 (72°f)	7[g]	8[g]	9[g]	9[g]	10[g]	2bbc072
6000	40:1	16000	52 (126°f)	9[g]	9[g]	S	S	S	2bbc126
6000	40:1	16000	67 (153°f)	9[g]	8[g]	8[g]	S	S	2bbc153
6000	40:1	16000	75 (167°f)	8[g]	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2bbc167
6000	80:1	4000	22 (72°f)	5[s]	7[g]	7[g]	8[g]	9[g]	2bca072
6000	80:1	4000	52 (126°f)	8[g]	7[g]	7[g]	8[g]	9[g]	2bca126
6000	80:1	4000	67 (153°f)	8[g]	7[g]	8[g]	9[g]	9[g]	2bca153
6000	80:1	4000	75 (167°f)	7[g]	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2bca167
6000	80:1	8000	22 (72°f)	4[s]	7[g]	8[g]	8[g]	9[g]	2bcb072
6000	80:1	8000	52 (126°f)	8[g]	8[g]	8[g]	8[g]	8[g]	2bcb126
6000	80:1	8000	67 (153°f)	8[g]	7[g]	8[g]	9[g]	9[g]	2bcb153
6000	80:1	8000	75 (167°f)	7[g]	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2bcb167
6000	80:1	16000	22 (72°f)	4[s]	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2bcc072
6000	80:1	16000	52 (126°f)	8[g]	8[g]	8[g]	9[g]	9[g]	2bcc126
6000	80:1	16000	67 (153°f)	9[g]	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2bcc153
6000	80:1	16000	75 (167°f)	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	9[g]	2bcc167

Fuente: El autor.

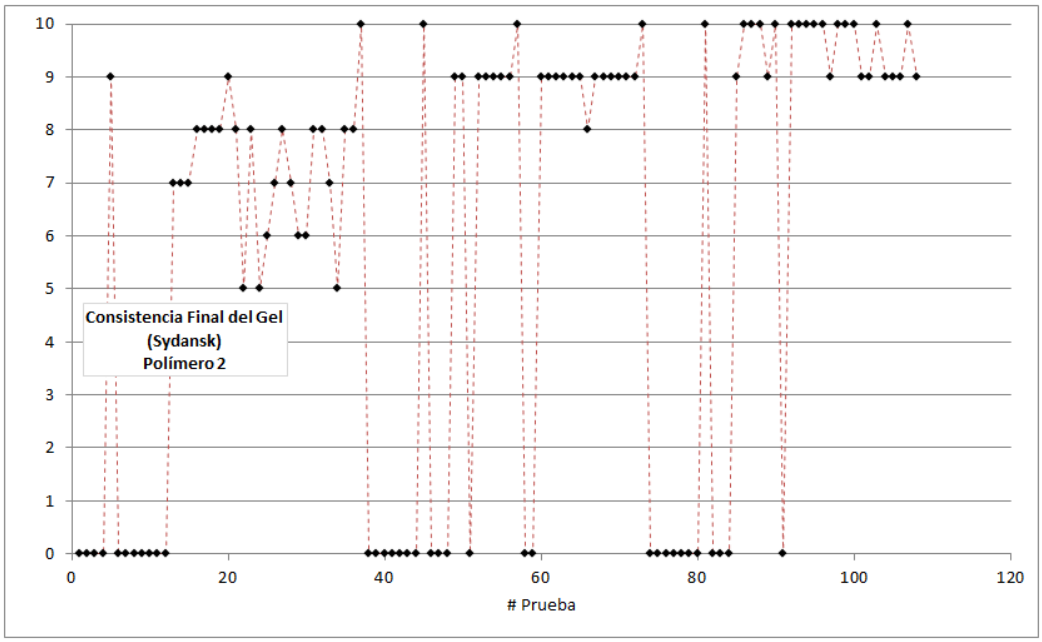
Tabla 3A. Resultados de análisis tipo Sydansk para P2 a 8.000 PPM.

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
8000	20:1	4000	22 (72°f)	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	10[e]	2caa072
8000	20:1	4000	52 (126°f)	10[e]	S	S	S	S	2caa126
8000	20:1	4000	67 (153°f)	S	S	S	S	S	2caa153
8000	20:1	4000	75 (167°f)	S	S	S	S	S	2caa167
8000	20:1	8000	22 (72°f)	8[g]	9[g]	9[g]	9[g]	S	2cab072

				HORAS					
[poly] PPM	**[x-linker] Poly:X-linker**	**[NaCl] PPM**	**T [°C]**	**24**	**168**	**336**	**504**	**672**	**Code**
8000	20:1	8000	52 (126°f)	S	S	S	S	S	2cab126
8000	20:1	8000	67 (153°f)	S	S	S	S	S	2cab153
8000	20:1	8000	75 (167°f)	S	S	S	S	S	2cab167
8000	20:1	16000	22 (72°f)	8^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	10^{e}	2cac072
8000	20:1	16000	52 (126°f)	S	S	S	S	S	2cac126
8000	20:1	16000	67 (153°f)	S	S	S	S	S	2cac153
8000	20:1	16000	75 (167°f)	S	S	S	S	S	2cac167
8000	40:1	4000	22 (72°f)	8^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	2cba072
8000	40:1	4000	52 (126°f)	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	2cba126
8000	40:1	4000	67 (153°f)	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	10^{e}	2cba153
8000	40:1	4000	75 (167°f)	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	2cba167
8000	40:1	8000	22 (72°f)	8^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	2cbb072
8000	40:1	8000	52 (126°f)	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	2cbb126
8000	40:1	8000	67 (153°f)	9^{g}	9^{g}	S	S	S	2cbb153
8000	40:1	8000	75 (167°f)	9^{g}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	2cbb167
8000	40:1	16000	22 (72°f)	8^{g}	9^{g}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	2cbc072
8000	40:1	16000	52 (126°f)	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	2cbc126
8000	40:1	16000	67 (153°f)	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	10^{e}	2cbc153
8000	40:1	16000	75 (167°f)	9^{g}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	2cbc167
8000	80:1	4000	22 (72°f)	8^{s}	8^{g}	8^{g}	8^{g}	9^{g}	2cca072
8000	80:1	4000	52 (126°f)	9^{g}	9^{g}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	2cca126
8000	80:1	4000	67 (153°f)	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	10^{e}	2cca153
8000	80:1	4000	75 (167°f)	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	10^{e}	2cca167
8000	80:1	8000	22 (72°f)	8^{s}	8^{g}	8^{g}	8^{g}	9^{g}	2ccb072
8000	80:1	8000	52 (126°f)	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	2ccb126
8000	80:1	8000	67 (153°f)	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	10^{e}	2ccb153
8000	80:1	8000	75 (167°f)	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	2ccb167
8000	80:1	16000	22 (72°f)	8^{s}	8^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	2ccc072
8000	80:1	16000	52 (126°f)	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	2ccc126
8000	80:1	16000	67 (153°f)	9^{g}	9^{g}	10^{e}	10^{e}	10^{e}	2ccc153
8000	80:1	16000	75 (167°f)	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	9^{g}	2ccc167

Fuente: El autor.

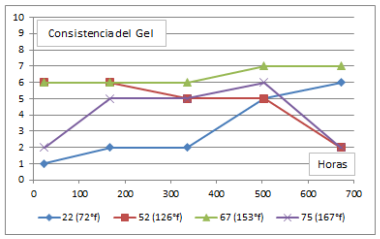
Figura 1A. Dispersión de los resultados obtenidos con las reacciones probadas con P2.



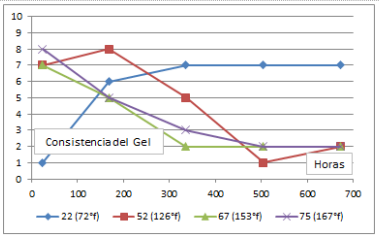
Fuente: El autor.

Figura 2A. Variación con el tiempo de las reacciones planteadas a 4.000 PPM de P1.

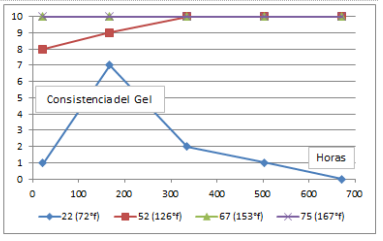
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	4000	22 (72°f)	1aca072	1	2	2	5	6
4000	80:1	4000	52 (126°f)	1aca126	6	6	5	5	2
4000	80:1	4000	67 (153°f)	1aca153	6	6	6	7	7
4000	80:1	4000	75 (167°f)	1aca167	2	5	5	6	2



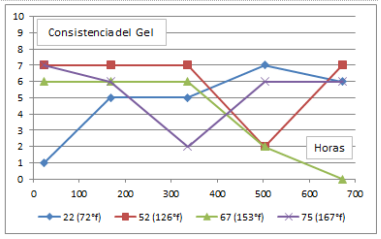
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	4000	22 (72°f)	1aba072	1	6	7	7	7
4000	40:1	4000	52 (126°f)	1aba126	7	8	5	1	2
4000	40:1	4000	67 (153°f)	1aba153	7	5	2	2	2
4000	40:1	4000	75 (167°f)	1aba167	8	5	3	2	2



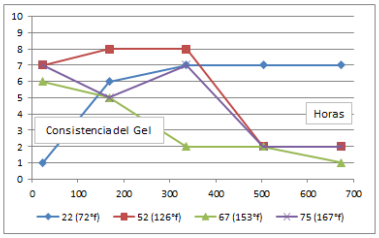
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	4000	22 (72°f)	1aaa072	1	7	2	1	0
4000	20:1	4000	52 (126°f)	1aaa126	8	9	10	10	10
4000	20:1	4000	67 (153°f)	1aaa153	10	10	10	10	10
4000	20:1	4000	75 (167°f)	1aaa167	10	10	10	10	10



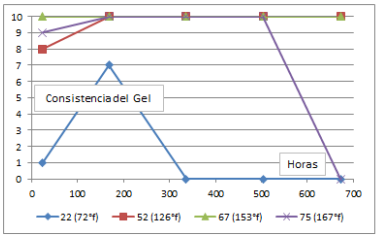
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	8000	22 (72°f)	1acb072	1	5	5	7	6
4000	80:1	8000	52 (126°f)	1acb126	7	7	7	2	7
4000	80:1	8000	67 (153°f)	1acb153	6	6	6	2	0
4000	80:1	8000	75 (167°f)	1acb167	7	6	2	6	6



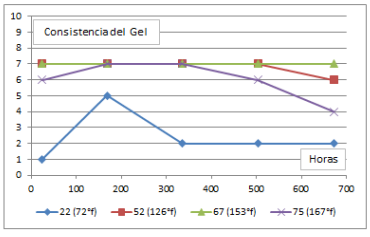
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	8000	22 (72°f)	1abb072	1	6	7	7	7
4000	40:1	8000	52 (126°f)	1abb126	7	8	8	2	2
4000	40:1	8000	67 (153°f)	1abb153	6	5	2	2	1
4000	40:1	8000	75 (167°f)	1abb167	7	5	7	2	2



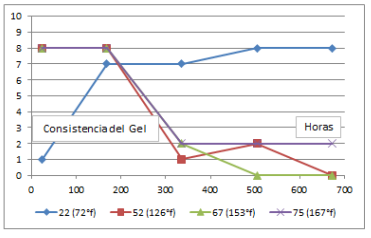
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	8000	22 (72°f)	1aab072	1	7	0	0	0
4000	20:1	8000	52 (126°f)	1aab126	8	10	10	10	10
4000	20:1	8000	67 (153°f)	1aab153	10	10	10	10	10
4000	20:1	8000	75 (167°f)	1aab167	9	10	10	10	0



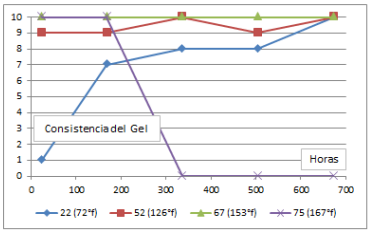
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	16000	22 (72°f)	1acc072	1	5	2	2	2
4000	80:1	16000	52 (126°f)	1acc126	7	7	7	7	6
4000	80:1	16000	67 (153°f)	1acc153	7	7	7	7	7
4000	80:1	16000	75 (167°f)	1acc167	6	7	7	6	4



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	16000	22 (72°f)	1abc072	1	7	7	8	8
4000	40:1	16000	52 (126°f)	1abc126	8	8	1	2	0
4000	40:1	16000	67 (153°f)	1abc153	8	8	2	0	0
4000	40:1	16000	75 (167°f)	1abc167	8	8	2	2	2



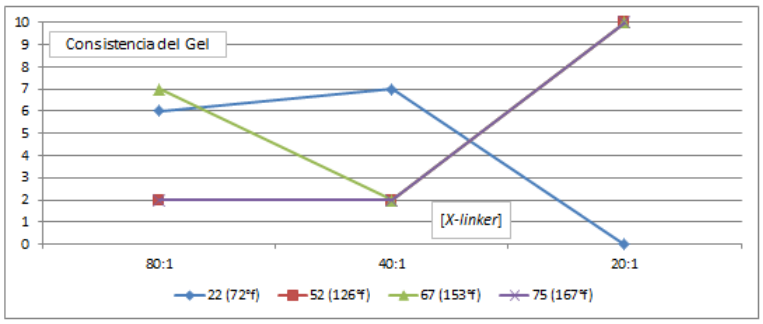
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	16000	22 (72°f)	1aac072	1	7	8	8	10
4000	20:1	16000	52 (126°f)	1aac126	9	9	10	9	10
4000	20:1	16000	67 (153°f)	1aac153	10	10	10	10	10
4000	20:1	16000	75 (167°f)	1aac167	10	10	0	0	0



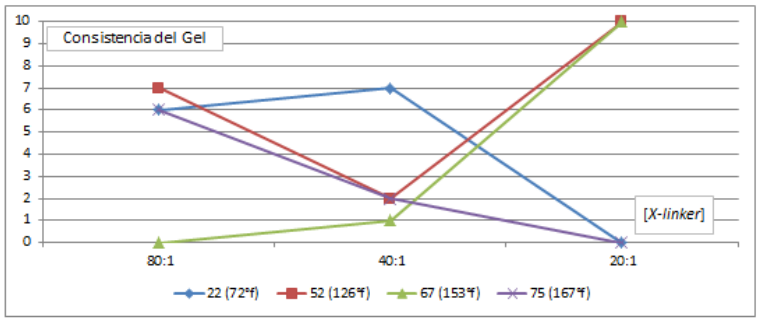
Fuente: El autor.

Figura 3A. Variación del τ final del gel con *x-linker* y T, a una [NaCl] y 4.000 PPM de P1.

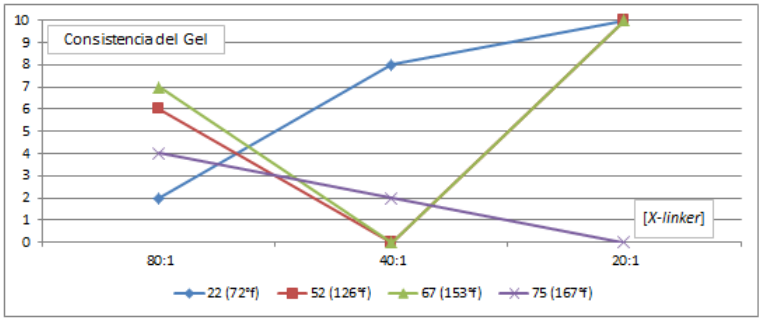
[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	4000	22 (72°f)	1aca072	6	7	0
4000	4000	52 (126°f)	1aca126	2	2	10
4000	4000	67 (153°f)	1aca153	7	2	10
4000	4000	75 (167°f)	1aca167	2	2	10



[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	8000	22 (72°f)	1acb072	6	7	0
4000	8000	52 (126°f)	1acb126	7	2	10
4000	8000	67 (153°f)	1acb153	0	1	10
4000	8000	75 (167°f)	1acb167	6	2	0

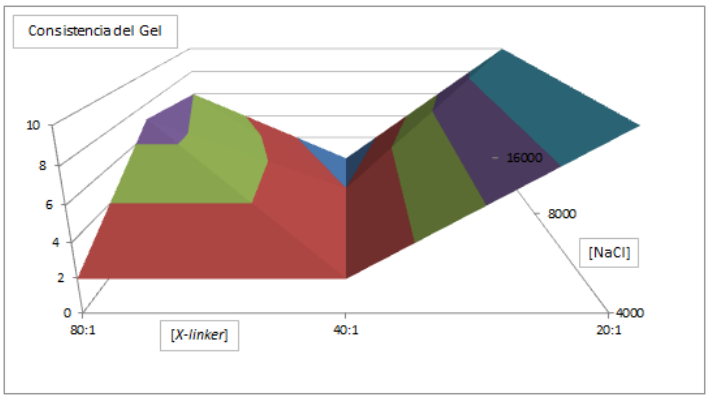


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	16000	22 (72°f)	1acc072	2	8	10
4000	16000	52 (126°f)	1acc126	6	0	10
4000	16000	67 (153°f)	1acc153	7	0	10
4000	16000	75 (167°f)	1acc167	4	2	0



Fuente: El autor.

Figura 4A. Variación del τ final del gel con *x-linker* y [NaCl] a 52°C y 4.000 PPM de P1.

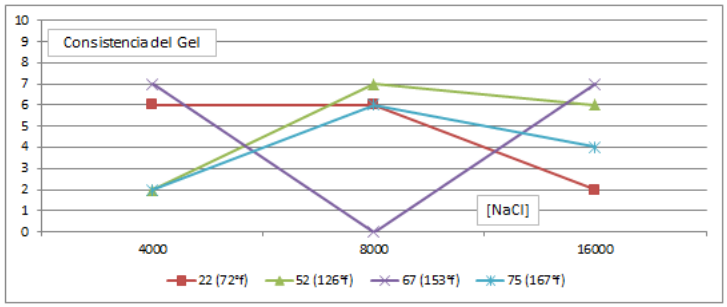


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	4000	52 (126°f)	1aca126	2	2	10
4000	8000	52 (126°f)	1acb126	7	2	10
4000	16000	52 (126°f)	1acc126	6	0	10

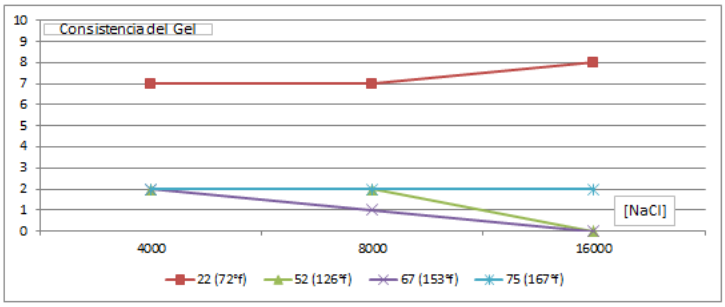
Fuente: El autor.

Figura 5A. Variación del τ final del gel con [NaCl] y T a una [*x-linker*] y 4.000 PPM de P1.

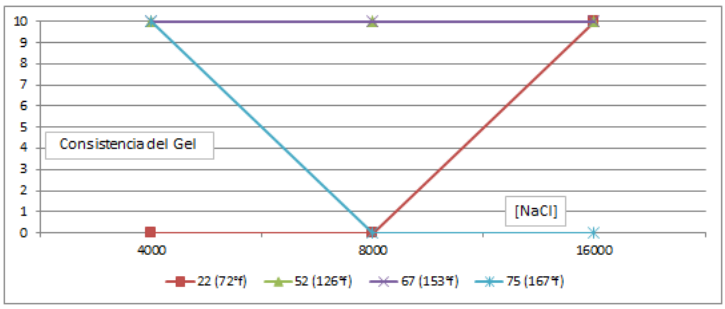
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	80:1	22 (72°f)	1aca072	6	6	2
4000	80:1	52 (126°f)	1aca126	2	7	6
4000	80:1	67 (153°f)	1aca153	7	0	7
4000	80:1	75 (167°f)	1aca167	2	6	4



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	40:1	22 (72°f)	1aba072	7	7	8
4000	40:1	52 (126°f)	1aba126	2	2	0
4000	40:1	67 (153°f)	1aba153	2	1	0
4000	40:1	75 (167°f)	1aba167	2	2	2

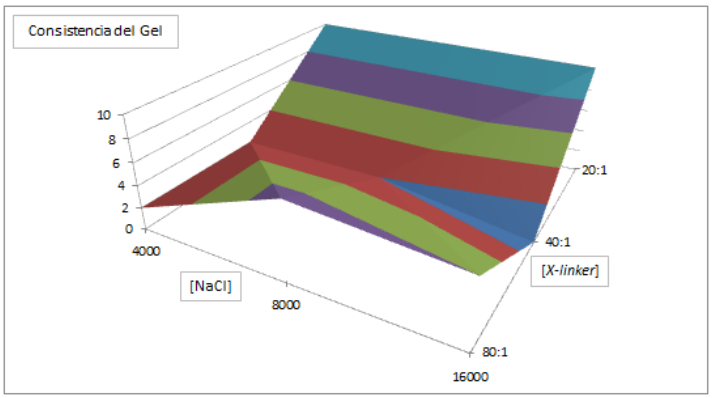


[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	20:1	22 (72°f)	1aaa072	0	0	10
4000	20:1	52 (126°f)	1aaa126	10	10	10
4000	20:1	67 (153°f)	1aaa153	10	10	10
4000	20:1	75 (167°f)	1aaa167	10	0	0



Fuente: El autor.

Figura 6A. Variación del τ final del gel con *x-linker* y [NaCl] a 52°C y 4.000 PPM de P1.

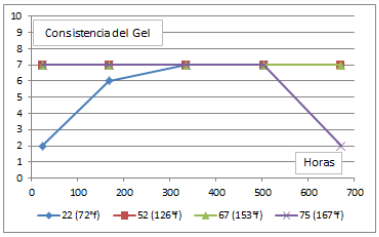


[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	80:1	52 (126°f)	1aca126	2	7	6
4000	40:1	52 (126°f)	1aba126	2	2	0
4000	20:1	52 (126°f)	1aaa126	10	10	10

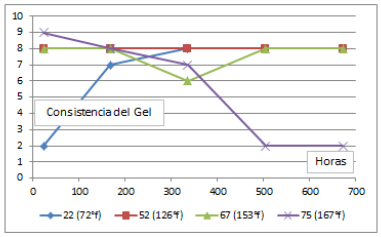
Fuente: El autor.

Figura 7A. Variación con el tiempo de las reacciones planteadas a 6.000 PPM de P1.

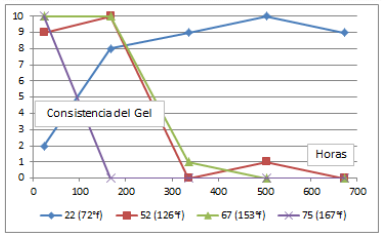
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	80:1	4000	22 (72°f)	1bca072	2	6	7	7	7
6000	80:1	4000	52 (126°f)	1bca126	7	7	7	7	7
6000	80:1	4000	67 (153°f)	1bca153	7	7	7	7	7
6000	80:1	4000	75 (167°f)	1bca167	7	7	7	7	2



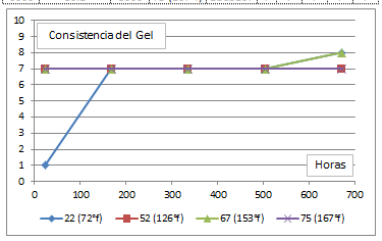
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	40:1	4000	22 (72°f)	1bba072	2	7	8	8	8
6000	40:1	4000	52 (126°f)	1bba126	8	8	8	8	8
6000	40:1	4000	67 (153°f)	1bba153	8	8	6	8	8
6000	40:1	4000	75 (167°f)	1bba167	9	8	7	2	2



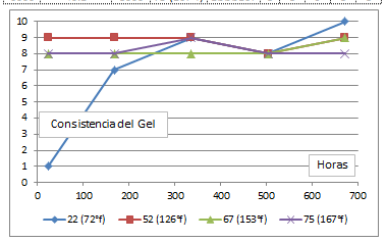
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	20:1	4000	22 (72°f)	1baa072	2	8	9	10	9
6000	20:1	4000	52 (126°f)	1baa126	9	10	0	1	0
6000	20:1	4000	67 (153°f)	1baa153	10	10	1	0	0
6000	20:1	4000	75 (167°f)	1baa167	10	0	0	0	0



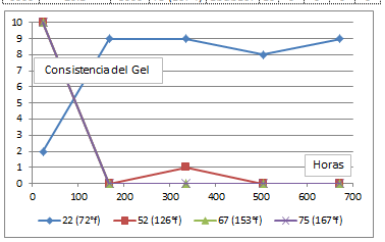
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	80:1	8000	22 (72°f)	1bcb072	1	7	7	7	8
6000	80:1	8000	52 (126°f)	1bcb126	7	7	7	7	7
6000	80:1	8000	67 (153°f)	1bcb153	7	7	7	7	8
6000	80:1	8000	75 (167°f)	1bcb167	7	7	7	7	7



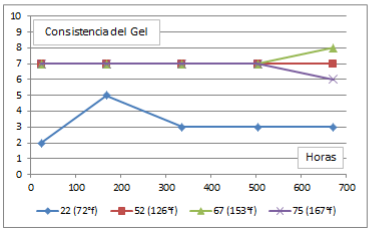
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	40:1	8000	22 (72°f)	1bbb072	1	7	9	8	10
6000	40:1	8000	52 (126°f)	1bbb126	9	9	9	8	9
6000	40:1	8000	67 (153°f)	1bbb153	8	8	8	8	9
6000	40:1	8000	75 (167°f)	1bbb167	8	8	9	8	8



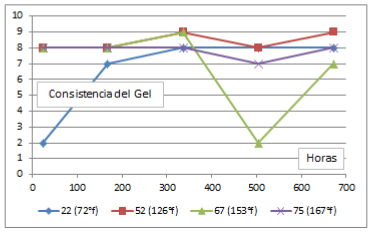
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	20:1	8000	22 (72°f)	1bab072	2	9	9	8	9
6000	20:1	8000	52 (126°f)	1bab126	10	0	1	0	0
6000	20:1	8000	67 (153°f)	1bab153	10	0	0	0	0
6000	20:1	8000	75 (167°f)	1bab167	10	0	0	0	0



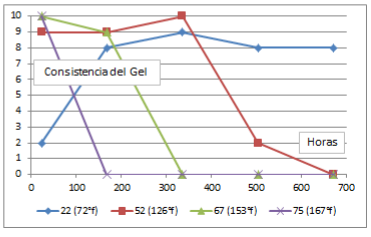
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	80:1	16000	22 (72°f)	1bcc072	2	5	3	3	3
6000	80:1	16000	52 (126°f)	1bcc126	7	7	7	7	7
6000	80:1	16000	67 (153°f)	1bcc153	7	7	7	7	8
6000	80:1	16000	75 (167°f)	1bcc167	7	7	7	7	6



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	40:1	16000	22 (72°f)	1bbc072	2	7	8	8	8
6000	40:1	16000	52 (126°f)	1bbc126	8	8	9	8	9
6000	40:1	16000	67 (153°f)	1bbc153	8	8	9	2	7
6000	40:1	16000	75 (167°f)	1bbc167	8	8	8	7	8



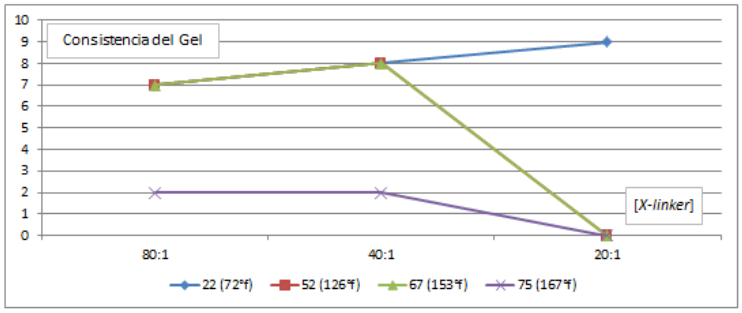
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	20:1	16000	22 (72°f)	1bac072	2	8	9	8	8
6000	20:1	16000	52 (126°f)	1bac126	9	9	10	2	0
6000	20:1	16000	67 (153°f)	1bac153	10	9	0	0	0
6000	20:1	16000	75 (167°f)	1bac167	10	0	0	0	0



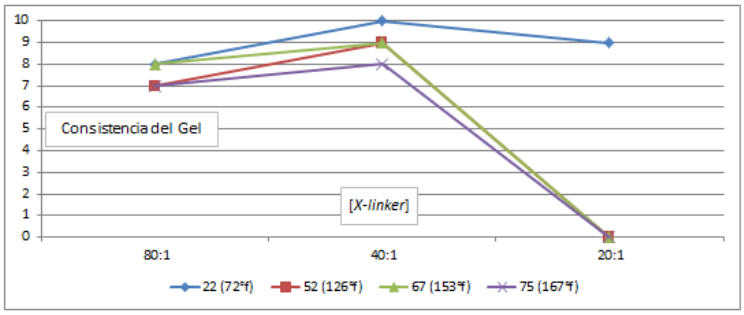
Fuente: El autor.

Figura 8A. Variación del τ final del gel con *x-linker* y T, a una [NaCl] y 6.000 PPM de P1.

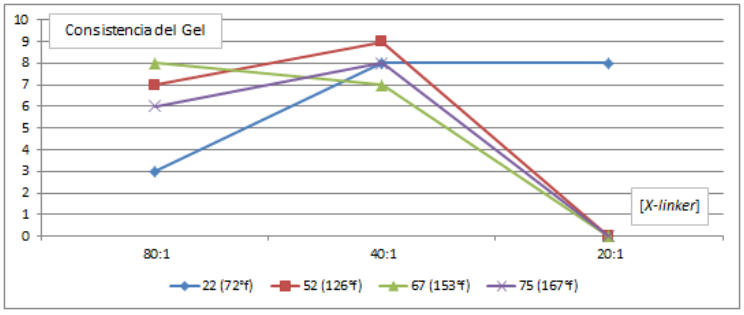
[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
6000	4000	22 (72°f)	1aca072	7	8	9
6000	4000	52 (126°f)	1aca126	7	8	0
6000	4000	67 (153°f)	1aca153	7	8	0
6000	4000	75 (167°f)	1aca167	2	2	0



[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
6000	8000	22 (72°f)	1acb072	8	10	9
6000	8000	52 (126°f)	1acb126	7	9	0
6000	8000	67 (153°f)	1acb153	8	9	0
6000	8000	75 (167°f)	1acb167	7	8	0

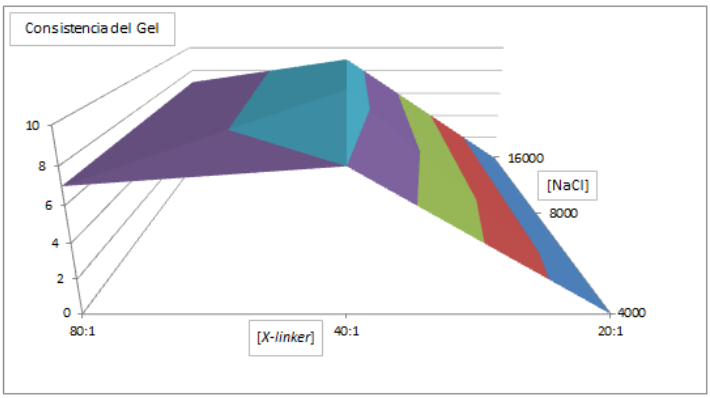


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
6000	16000	22 (72°f)	1acc072	3	8	8
6000	16000	52 (126°f)	1acc126	7	9	0
6000	16000	67 (153°f)	1acc153	8	7	0
6000	16000	75 (167°f)	1acc167	6	8	0



Fuente: El autor.

Figura 9A. Variación del τ final del gel con *x-linker* y [NaCl] a 52°C y 6.000 PPM de P1.

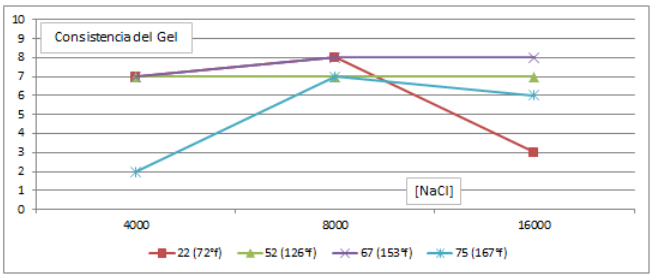


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
6000	4000	52 (126°f)	1aca126	7	8	0
6000	8000	52 (126°f)	1acb126	7	9	0
6000	16000	52 (126°f)	1acc126	7	9	0

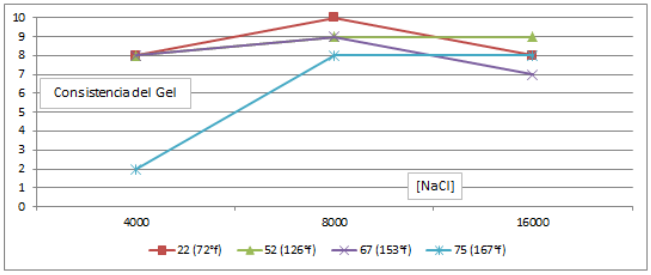
Fuente: El autor.

Figura 10A. Variación del τ final del gel con [NaCl] y T a una [*x-linker*] y 6.000 PPM de P1.

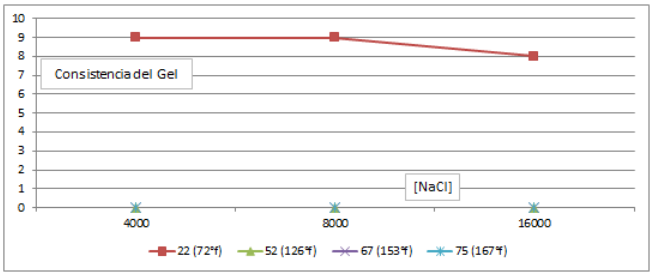
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
6000	80:1	22 (72°f)	1aca072	7	8	3
6000	80:1	52 (126°f)	1aca126	7	7	7
6000	80:1	67 (153°f)	1aca153	7	8	8
6000	80:1	75 (167°f)	1aca167	2	7	6



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
6000	40:1	22 (72°f)	1aba072	8	10	8
6000	40:1	52 (126°f)	1aba126	8	9	9
6000	40:1	67 (153°f)	1aba153	8	9	7
6000	40:1	75 (167°f)	1aba167	2	8	8

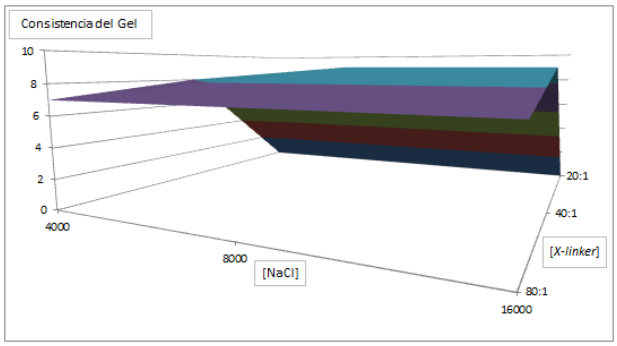


[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
6000	20:1	22 (72°f)	1aaa072	9	9	8
6000	20:1	52 (126°f)	1aaa126	0	0	0
6000	20:1	67 (153°f)	1aaa153	0	0	0
6000	20:1	75 (167°f)	1aaa167	0	0	0



Fuente: El autor.

Figura 11A. Variación del τ final del gel con *x-linker* y [NaCl] a 52°C y 6.000 PPM de P1.

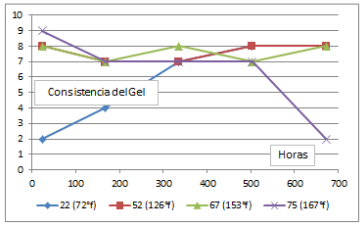


[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
6000	80:1	52 (126°f)	1aca126	7	7	7
6000	40:1	52 (126°f)	1aba126	8	9	9
6000	20:1	52 (126°f)	1aaa126	0	0	0

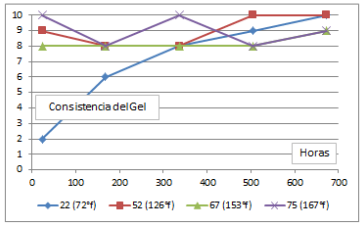
Fuente: El autor.

Figura 12A. Variación con el tiempo de las reacciones planteadas a 8.000 PPM de P1.

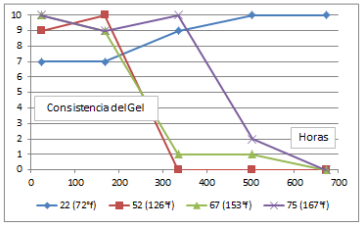
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	80:1	4000	22 (72°f)	1cca072	2	4	7	8	8
8000	80:1	4000	52 (126°f)	1cca126	8	7	7	8	8
8000	80:1	4000	67 (153°f)	1cca153	8	7	8	7	8
8000	80:1	4000	75 (167°f)	1cca167	9	7	7	7	2



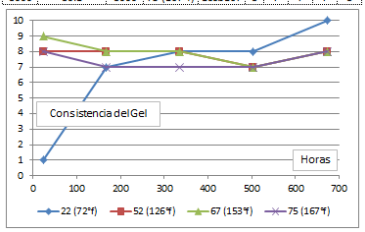
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	40:1	4000	22 (72°f)	1cba072	2	6	8	9	10
8000	40:1	4000	52 (126°f)	1cba126	9	8	8	10	10
8000	40:1	4000	67 (153°f)	1cba153	8	8	8	8	9
8000	40:1	4000	75 (167°f)	1cba167	10	8	10	8	9



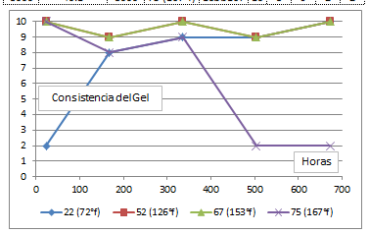
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	20:1	4000	22 (72°f)	1caa072	7	7	9	10	10
8000	20:1	4000	52 (126°f)	1caa126	9	10	0	0	0
8000	20:1	4000	67 (153°f)	1caa153	10	9	1	1	0
8000	20:1	4000	75 (167°f)	1caa167	10	9	10	2	0



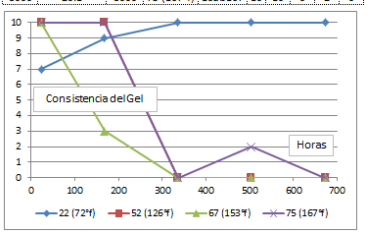
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	80:1	8000	22 (72°f)	1ccb072	1	7	8	8	10
8000	80:1	8000	52 (126°f)	1ccb126	8	8	8	7	8
8000	80:1	8000	67 (153°f)	1ccb153	9	8	8	7	8
8000	80:1	8000	75 (167°f)	1ccb167	8	7	7	7	8



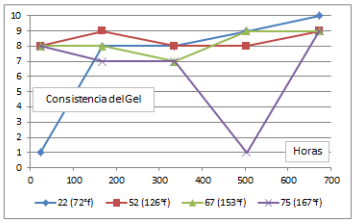
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	40:1	8000	22 (72°f)	1cbb072	2	8	9	9	10
8000	40:1	8000	52 (126°f)	1cbb126	10	9	10	9	10
8000	40:1	8000	67 (153°f)	1cbb153	10	9	10	9	10
8000	40:1	8000	75 (167°f)	1cbb167	10	8	9	2	2



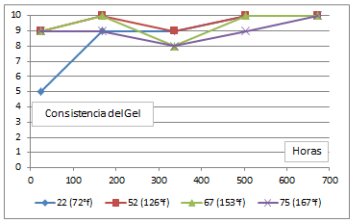
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	20:1	8000	22 (72°f)	1cab072	7	9	10	10	10
8000	20:1	8000	52 (126°f)	1cab126	10	10	0	0	0
8000	20:1	8000	67 (153°f)	1cab153	10	3	0	0	0
8000	20:1	8000	75 (167°f)	1cab167	10	10	0	2	0



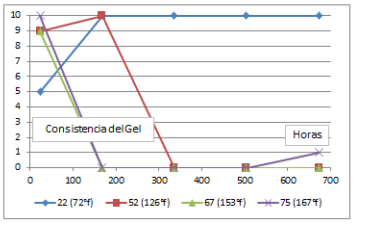
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	80:1	16000	22 (72°f)	1ccc072	1	8	8	9	10
8000	80:1	16000	52 (126°f)	1ccc126	8	9	8	8	9
8000	80:1	16000	67 (153°f)	1ccc153	8	8	7	9	9
8000	80:1	16000	75 (167°f)	1ccc167	8	7	7	1	9



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	40:1	16000	22 (72°f)	1cbc072	5	9	9	10	10
8000	40:1	16000	52 (126°f)	1cbc126	9	10	9	10	10
8000	40:1	16000	67 (153°f)	1cbc153	9	10	8	10	10
8000	40:1	16000	75 (167°f)	1cbc167	9	9	8	9	10



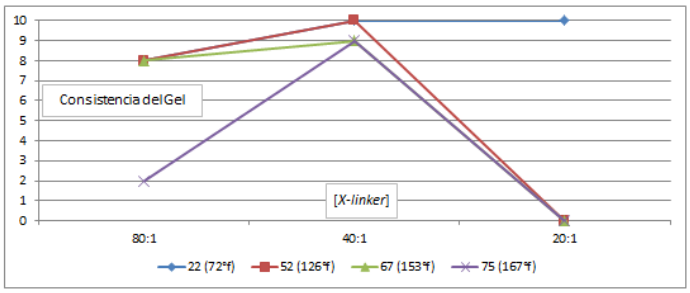
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
8000	20:1	16000	22 (72°f)	1cac072	5	10	10	10	10
8000	20:1	16000	52 (126°f)	1cac126	9	10	0	0	0
8000	20:1	16000	67 (153°f)	1cac153	9	0	0	0	0
8000	20:1	16000	75 (167°f)	1cac167	10	0	0	0	1



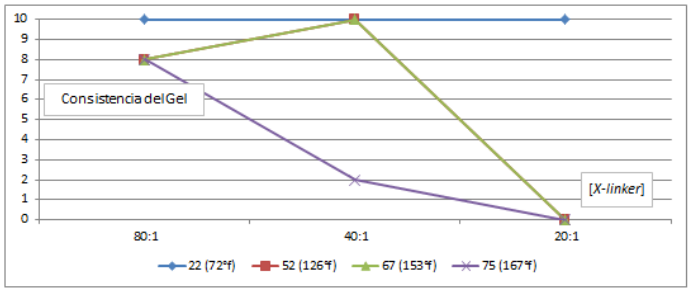
Fuente: El autor.

Figura 13A. Variación del τ final del gel con *x-linker* y T, a una [NaCl] y 8.000 PPM de P1.

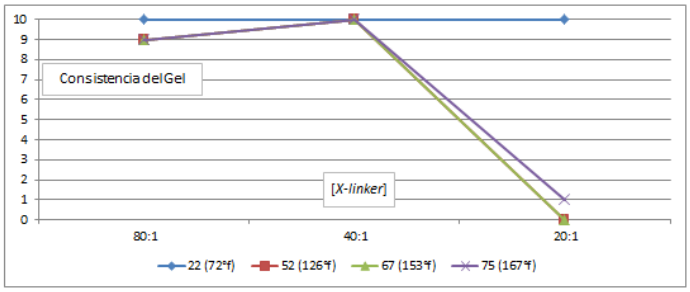
[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
8000	4000	22 (72°f)	1aca072	8	10	10
8000	4000	52 (126°f)	1aca126	8	10	0
8000	4000	67 (153°f)	1aca153	8	9	0
8000	4000	75 (167°f)	1aca167	2	9	0



[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
8000	8000	22 (72°f)	1acb072	10	10	10
8000	8000	52 (126°f)	1acb126	8	10	0
8000	8000	67 (153°f)	1acb153	8	10	0
8000	8000	75 (167°f)	1acb167	8	2	0

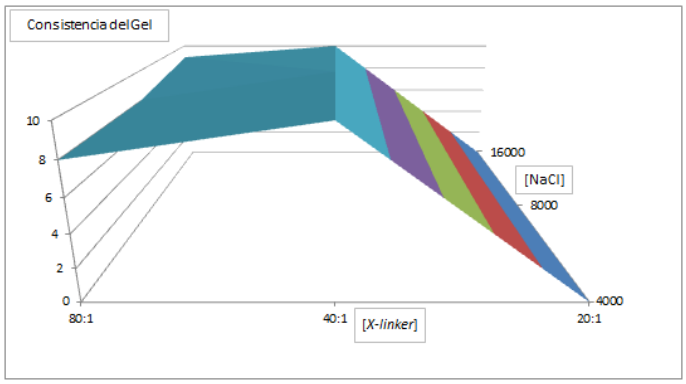


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
8000	16000	22 (72°f)	1acc072	10	10	10
8000	16000	52 (126°f)	1acc126	9	10	0
8000	16000	67 (153°f)	1acc153	9	10	0
8000	16000	75 (167°f)	1acc167	9	10	1



Fuente: El autor.

Figura 14A. Variación del τ final del gel con *x-linker* y [NaCl] a 52°C y 8.000 PPM de P1.

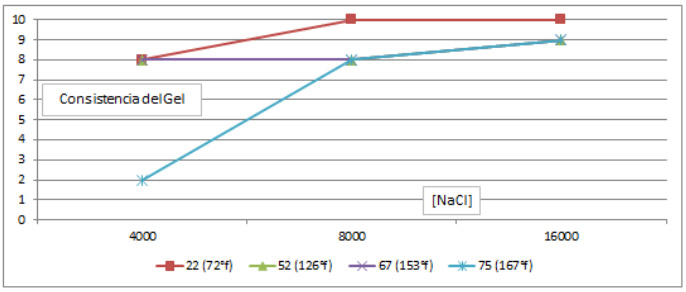


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
8000	4000	52 (126°f)	1aca126	8	10	0
8000	8000	52 (126°f)	1acb126	8	10	0
8000	16000	52 (126°f)	1acc126	9	10	0

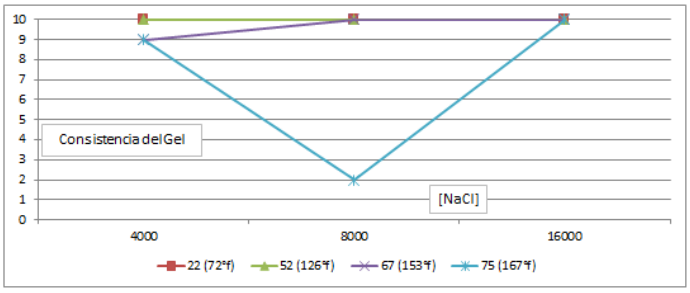
Fuente: El autor.

Figura 15A. Variación del τ final del gel con [NaCl] y T a una [*x-linker*] y 8.000 PPM de P1.

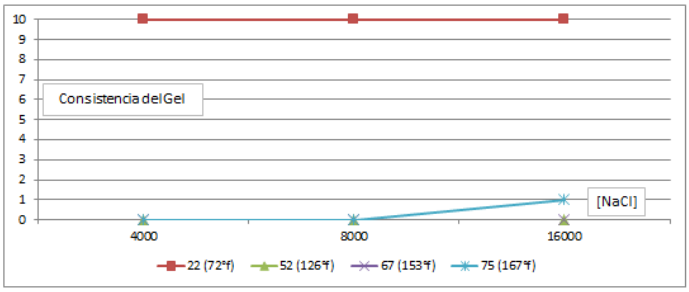
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
8000	80:1	22 (72°f)	1aca072	8	10	10
8000	80:1	52 (126°f)	1aca126	8	8	9
8000	80:1	67 (153°f)	1aca153	8	8	9
8000	80:1	75 (167°f)	1aca167	2	8	9



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
8000	40:1	22 (72°f)	1aba072	10	10	10
8000	40:1	52 (126°f)	1aba126	10	10	10
8000	40:1	67 (153°f)	1aba153	9	10	10
8000	40:1	75 (167°f)	1aba167	9	2	10

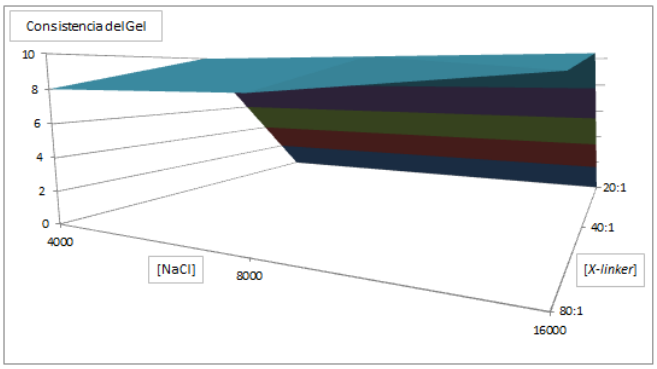


[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
8000	20:1	22 (72°f)	1aaa072	10	10	10
8000	20:1	52 (126°f)	1aaa126	0	0	0
8000	20:1	67 (153°f)	1aaa153	0	0	0
8000	20:1	75 (167°f)	1aaa167	0	0	1



Fuente: El autor.

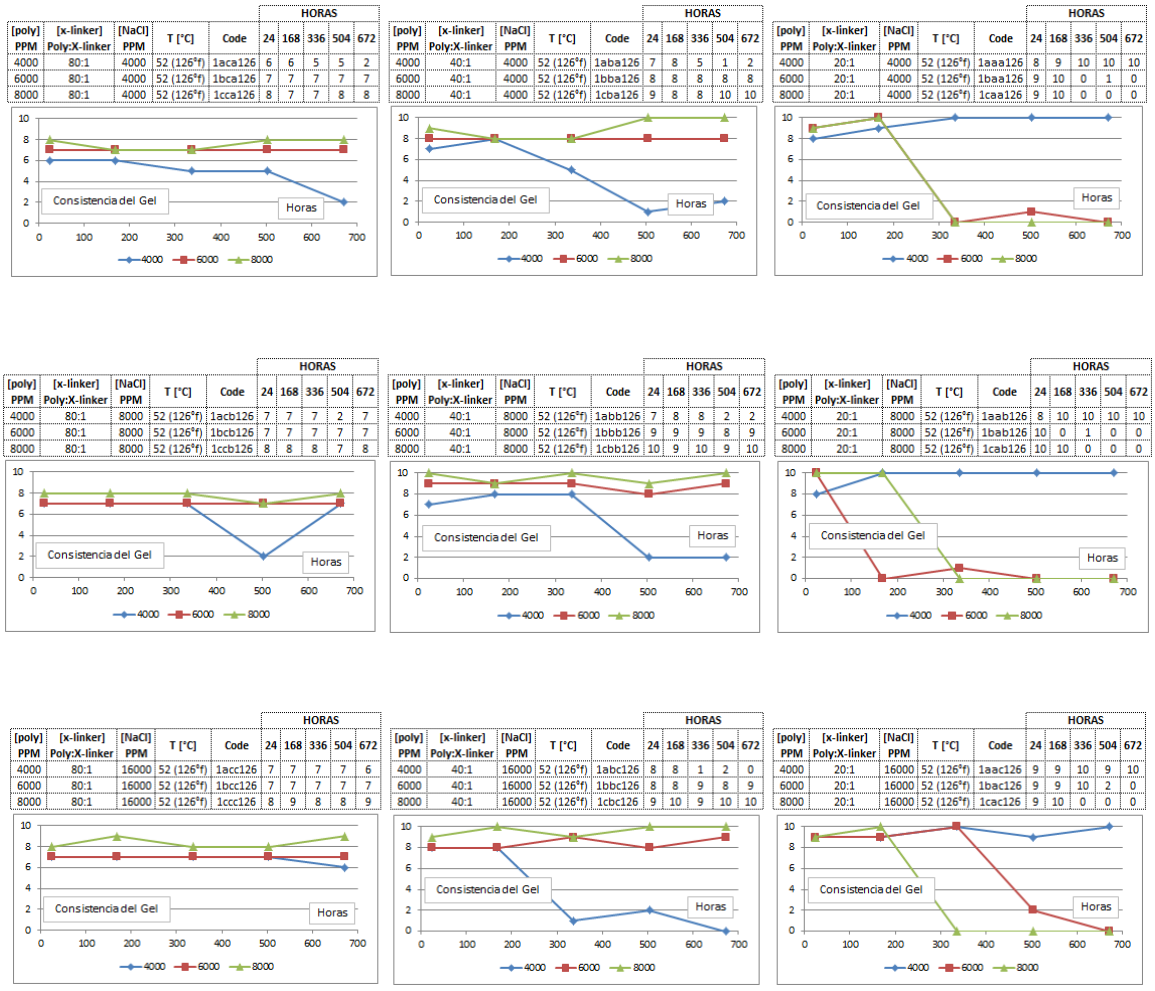
Figura 16A. Variación del τ final del gel con *x-linker* y [NaCl] a 52°C y 8.000 PPM de P1.



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
8000	80:1	52 (126°f)	1aca126	8	8	9
8000	40:1	52 (126°f)	1aba126	10	10	10
8000	20:1	52 (126°f)	1aaa126	0	0	0

Fuente: El autor.

Figura 17A. Variación con el tiempo y [poly] de las reacciones planteadas a 52°C, [x-linker] y [NaCl] para P1.



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	4000	52 (126°f)	1aca126	6	6	5	5	2
6000	80:1	4000	52 (126°f)	1bca126	7	7	7	7	7
8000	80:1	4000	52 (126°f)	1cca126	8	7	7	8	8

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	4000	52 (126°f)	1aba126	7	8	5	1	2
6000	40:1	4000	52 (126°f)	1bba126	8	8	8	8	8
8000	40:1	4000	52 (126°f)	1cba126	9	8	8	10	10

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	4000	52 (126°f)	1aaa126	8	9	10	10	10
6000	20:1	4000	52 (126°f)	1baa126	9	10	0	1	0
8000	20:1	4000	52 (126°f)	1caa126	9	10	0	0	0

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	8000	52 (126°f)	1acb126	7	7	7	2	7
6000	80:1	8000	52 (126°f)	1bcb126	7	7	7	7	7
8000	80:1	8000	52 (126°f)	1ccb126	8	8	8	7	8

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	8000	52 (126°f)	1abb126	7	8	8	2	2
6000	40:1	8000	52 (126°f)	1bbb126	9	9	9	8	9
8000	40:1	8000	52 (126°f)	1cbb126	10	9	10	9	10

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	8000	52 (126°f)	1aab126	8	10	10	10	10
6000	20:1	8000	52 (126°f)	1bab126	10	0	1	0	0
8000	20:1	8000	52 (126°f)	1cab126	10	10	0	0	0

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	16000	52 (126°f)	1acc126	7	7	7	7	6
6000	80:1	16000	52 (126°f)	1bcc126	7	7	7	7	7
8000	80:1	16000	52 (126°f)	1ccc126	8	9	8	8	9

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	16000	52 (126°f)	1abc126	8	8	1	2	0
6000	40:1	16000	52 (126°f)	1bbc126	8	8	9	8	9
8000	40:1	16000	52 (126°f)	1cbc126	9	10	9	10	10

[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	16000	52 (126°f)	1aac126	9	9	10	9	10
6000	20:1	16000	52 (126°f)	1bac126	9	9	10	2	0
8000	20:1	16000	52 (126°f)	1cac126	9	10	0	0	0

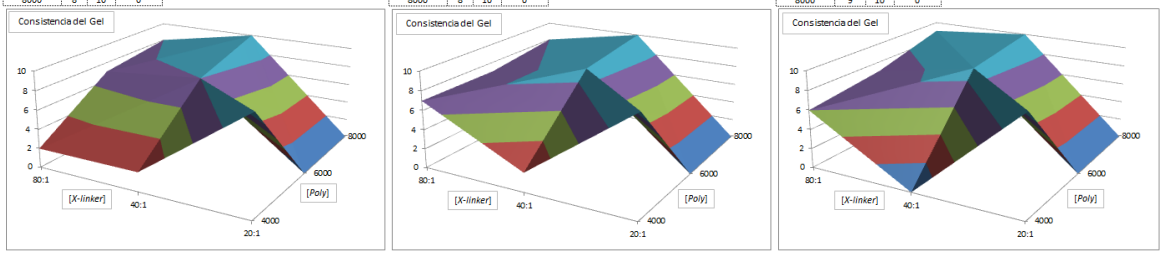
Fuente: El autor.

Figura 18A. Variación del τ final del gel con [poly] y [*x-linker*] a una [NaCl] y 52°C para P1.

[NaCl] PPM	4000	T [°C]	52 (126°f)
[poly] PPM	80:1	40:1	20:1
4000	2	2	10
6000	7	8	0
8000	8	10	0

[NaCl] PPM	8000	T [°C]	52 (126°f)
[poly] PPM	80:1	40:1	20:1
4000	7	2	10
6000	7	9	0
8000	8	10	0

[NaCl] PPM	16000	T [°C]	52 (126°f)
[poly] PPM	80:1	40:1	20:1
4000	6	0	10
6000	7	9	0
8000	9	10	0



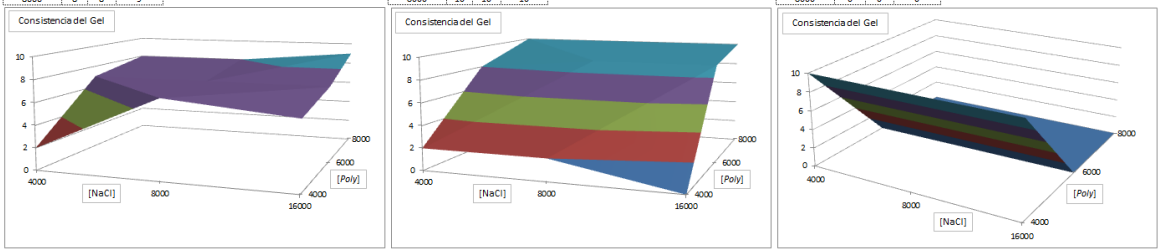
Fuente: El autor.

Figura 19A. Variación del τ final del gel con [poly] y [NaCl] a una [*x-linker*] y 52°C para P1.

[x-linker] Poly:X-linker	80:1	T [°C]	52 (126°f)
[poly] PPM	4000	8000	16000
4000	2	7	6
6000	7	7	7
8000	8	8	9

[x-linker] Poly:X-linker	40:1	T [°C]	52 (126°f)
[poly] PPM	4000	8000	16000
4000	2	2	0
6000	8	9	9
8000	10	10	10

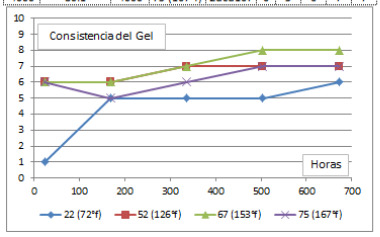
[x-linker] Poly:X-linker	20:1	T [°C]	52 (126°f)
[poly] PPM	4000	8000	16000
4000	10	10	10
6000	0	0	0
8000	0	0	0



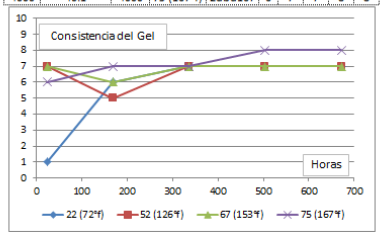
Fuente: El autor.

Figura 20A. Variación con el tiempo de las reacciones planteadas a 4.000 PPM de P2.

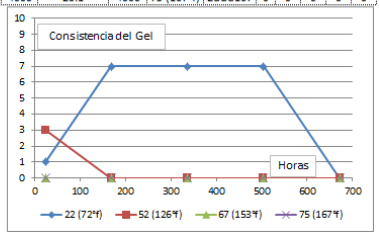
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	4000	22 (72°f)	2aca072	1	5	5	5	6
4000	80:1	4000	52 (126°f)	2aca126	6	6	7	7	7
4000	80:1	4000	67 (153°f)	2aca153	6	6	7	8	8
4000	80:1	4000	75 (167°f)	2aca167	6	5	6	7	7



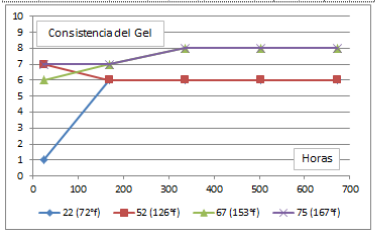
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	4000	22 (72°f)	2aba072	1	6	7	7	7
4000	40:1	4000	52 (126°f)	2aba126	7	5	7	7	7
4000	40:1	4000	67 (153°f)	2aba153	7	6	7	7	7
4000	40:1	4000	75 (167°f)	2aba167	6	7	7	8	8



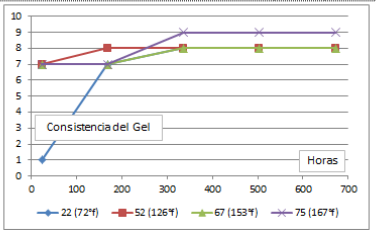
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	4000	22 (72°f)	2aaa072	1	7	7	7	0
4000	20:1	4000	52 (126°f)	2aaa126	3	0	0	0	0
4000	20:1	4000	67 (153°f)	2aaa153	0	0	0	0	0
4000	20:1	4000	75 (167°f)	2aaa167	0	0	0	0	0



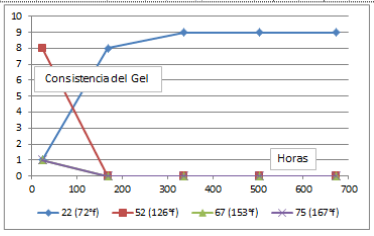
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	8000	22 (72°f)	2acb072	1	6	6	6	6
4000	80:1	8000	52 (126°f)	2acb126	7	6	6	6	6
4000	80:1	8000	67 (153°f)	2acb153	6	7	8	8	8
4000	80:1	8000	75 (167°f)	2acb167	7	7	8	8	8



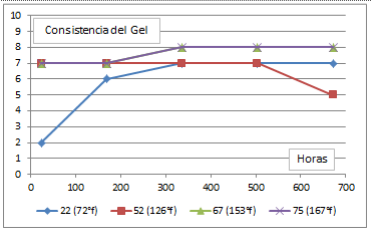
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	8000	22 (72°f)	2abb072	1	7	8	8	8
4000	40:1	8000	52 (126°f)	2abb126	7	8	8	8	8
4000	40:1	8000	67 (153°f)	2abb153	7	7	8	8	8
4000	40:1	8000	75 (167°f)	2abb167	7	7	9	9	9



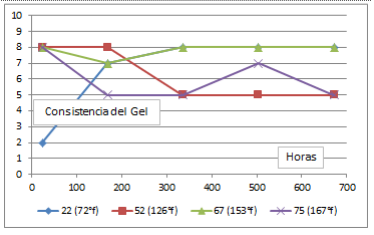
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	8000	22 (72°f)	2aab072	1	8	9	9	9
4000	20:1	8000	52 (126°f)	2aab126	8	0	0	0	0
4000	20:1	8000	67 (153°f)	2aab153	1	0	0	0	0
4000	20:1	8000	75 (167°f)	2aab167	1	0	0	0	0



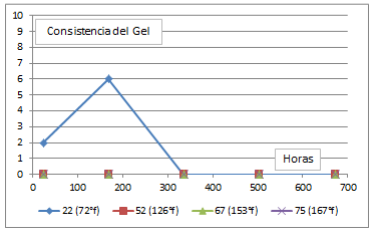
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	16000	22 (72°f)	2acc072	2	6	7	7	7
4000	80:1	16000	52 (126°f)	2acc126	7	7	7	7	5
4000	80:1	16000	67 (153°f)	2acc153	7	7	8	8	8
4000	80:1	16000	75 (167°f)	2acc167	7	7	8	8	8



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	40:1	16000	22 (72°f)	2abc072	2	7	8	8	8
4000	40:1	16000	52 (126°f)	2abc126	8	8	5	5	5
4000	40:1	16000	67 (153°f)	2abc153	8	7	8	8	8
4000	40:1	16000	75 (167°f)	2abc167	8	5	5	7	5



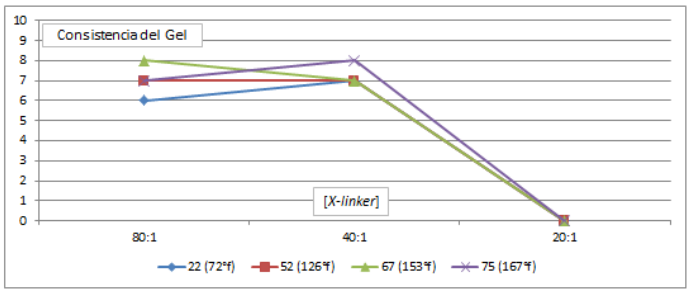
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	20:1	16000	22 (72°f)	2aac072	2	6	0	0	0
4000	20:1	16000	52 (126°f)	2aac126	0	0	0	0	0
4000	20:1	16000	67 (153°f)	2aac153	0	0	0	0	0
4000	20:1	16000	75 (167°f)	2aac167	0	0	0	0	0



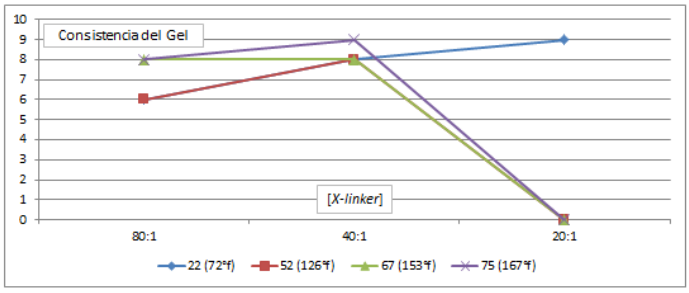
Fuente: El autor.

Figura 21A. Variación del τ final del gel con [*x-linker*] y T, a una [NaCl] y 4.000 PPM de P2.

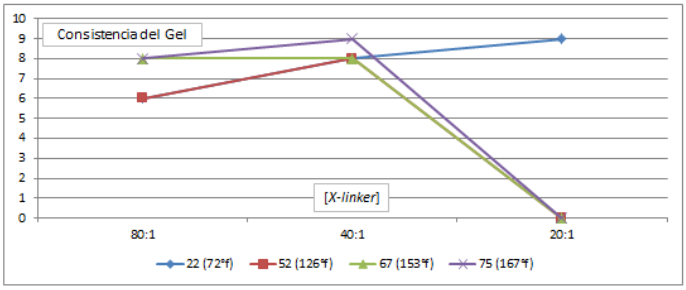
[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	4000	22 (72°f)	2aca072	6	7	0
4000	4000	52 (126°f)	2aca126	7	7	0
4000	4000	67 (153°f)	2aca153	8	7	0
4000	4000	75 (167°f)	2aca167	7	8	0



[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	8000	22 (72°f)	2acb072	6	8	9
4000	8000	52 (126°f)	2acb126	6	8	0
4000	8000	67 (153°f)	2acb153	8	8	0
4000	8000	75 (167°f)	2acb167	8	9	0

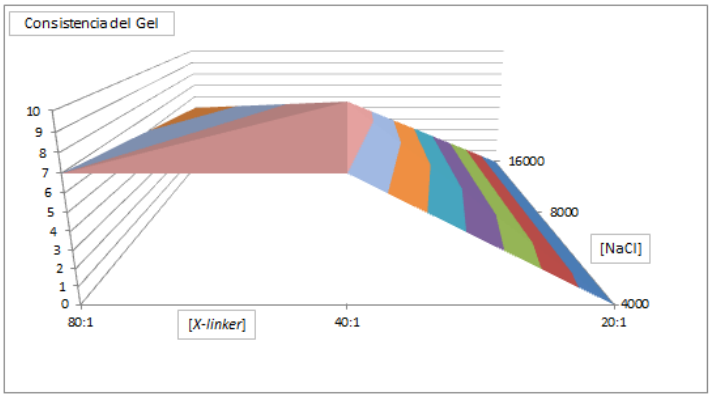


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	16000	22 (72°f)	2acc072	7	8	0
4000	16000	52 (126°f)	2acc126	5	5	0
4000	16000	67 (153°f)	2acc153	8	8	0
4000	16000	75 (167°f)	2acc167	8	5	0



Fuente: El autor.

Figura 22A. Variación del τ final del gel con [*x-linker*] y [NaCl] a 52°C y 4.000 PPM de P2.

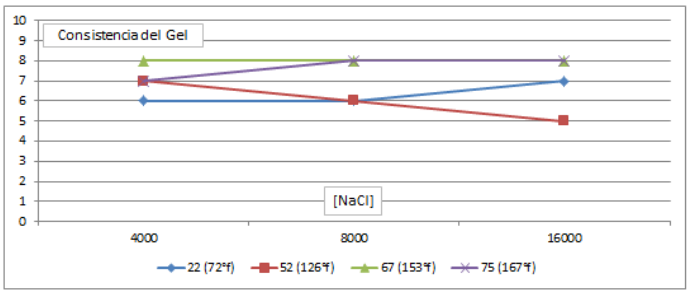


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
4000	4000	52 (126°f)	2aca126	7	7	0
4000	8000	52 (126°f)	2acb126	6	8	0
4000	16000	52 (126°f)	2acc126	5	5	0

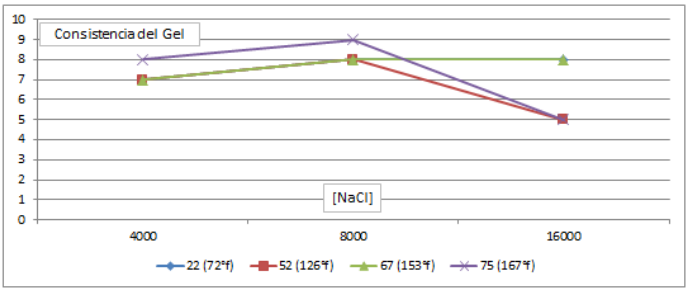
Fuente: El autor.

Figura 23A. Variación del τ final del gel con [NaCl] y T a una [*x-linker*] y 4.000 PPM de P2.

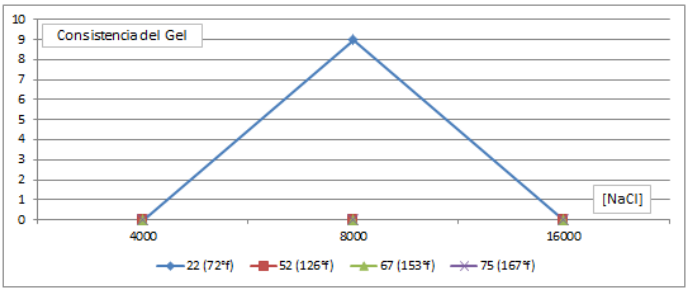
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	80:1	22 (72°f)	2aca072	6	6	7
4000	80:1	52 (126°f)	2aca126	7	6	5
4000	80:1	67 (153°f)	2aca153	8	8	8
4000	80:1	75 (167°f)	2aca167	7	8	8



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	40:1	22 (72°f)	2aba072	7	8	8
4000	40:1	52 (126°f)	2aba126	7	8	5
4000	40:1	67 (153°f)	2aba153	7	8	8
4000	40:1	75 (167°f)	2aba167	8	9	5

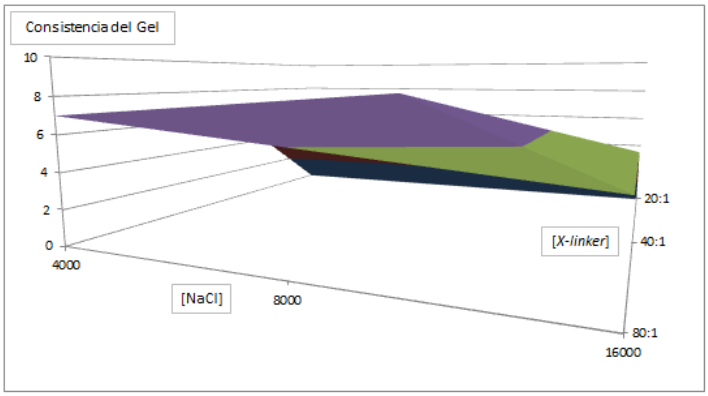


[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	20:1	22 (72°f)	2aaa072	0	9	0
4000	20:1	52 (126°f)	2aaa126	0	0	0
4000	20:1	67 (153°f)	2aaa153	0	0	0
4000	20:1	75 (167°f)	2aaa167	0	0	0



Fuente: El autor.

Figura 24A. Variación del τ final del gel con [*x-linker*] y [NaCl] a 52°C y 4.000 PPM de P2.

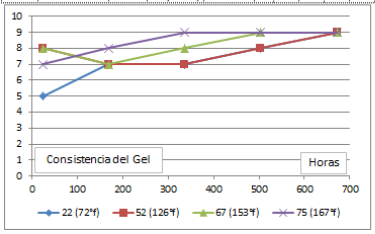


[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
4000	80:1	52 (126°f)	2aca126	7	6	5
4000	40:1	52 (126°f)	2aba126	7	8	5
4000	20:1	52 (126°f)	2aaa126	0	0	0

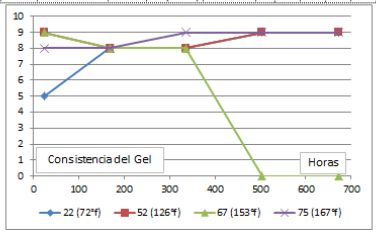
Fuente: El autor.

Figura 25A. Variación con el tiempo de las reacciones planteadas a 6.000 PPM de P2.

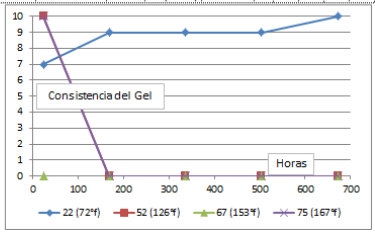
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	80:1	4000	22 (72°f)	2bca072	5	7	7	8	9
6000	80:1	4000	52 (126°f)	2bca126	8	7	7	8	9
6000	80:1	4000	67 (153°f)	2bca153	8	7	8	9	9
6000	80:1	4000	75 (167°f)	2bca167	7	8	9	9	9



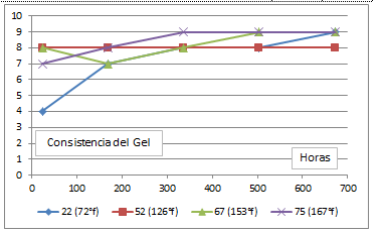
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	40:1	4000	22 (72°f)	2bba072	5	8	8	9	9
6000	40:1	4000	52 (126°f)	2bba126	9	8	8	9	9
6000	40:1	4000	67 (153°f)	2bba153	9	8	8	0	0
6000	40:1	4000	75 (167°f)	2bba167	8	8	9	9	9



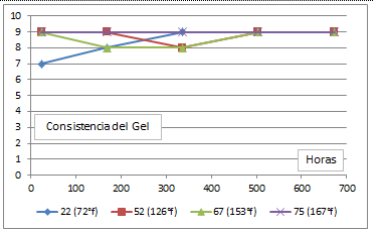
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	20:1	4000	22 (72°f)	2baa072	7	9	9	9	10
6000	20:1	4000	52 (126°f)	2baa126	10	0	0	0	0
6000	20:1	4000	67 (153°f)	2baa153	0	0	0	0	0
6000	20:1	4000	75 (167°f)	2baa167	10	0	0	0	0



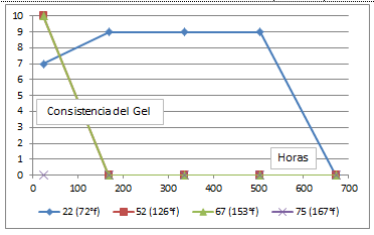
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	80:1	8000	22 (72°f)	2bcb072	4	7	8	8	9
6000	80:1	8000	52 (126°f)	2bcb126	8	8	8	8	8
6000	80:1	8000	67 (153°f)	2bcb153	8	7	8	9	9
6000	80:1	8000	75 (167°f)	2bcb167	7	8	9	9	9



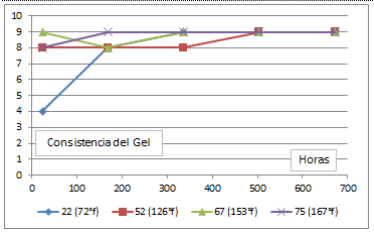
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	40:1	8000	22 (72°f)	2bbb072	7	8	9	9	9
6000	40:1	8000	52 (126°f)	2bbb126	9	9	8	9	9
6000	40:1	8000	67 (153°f)	2bbb153	9	8	8	9	9
6000	40:1	8000	75 (167°f)	2bbb167	9	9	9	9	9



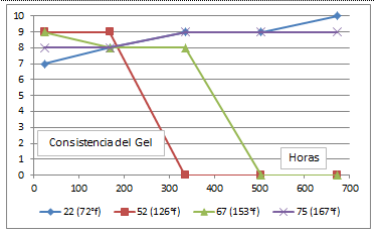
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	20:1	8000	22 (72°f)	2bab072	7	9	9	9	0
6000	20:1	8000	52 (126°f)	2bab126	10	0	0	0	0
6000	20:1	8000	67 (153°f)	2bab153	10	0	0	0	0
6000	20:1	8000	75 (167°f)	2bab167	0	0	0	0	0



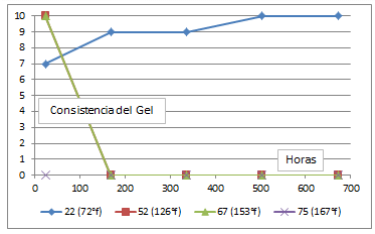
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	80:1	16000	22 (72°f)	2bcc072	4	8	9	9	9
6000	80:1	16000	52 (126°f)	2bcc126	8	8	8	9	9
6000	80:1	16000	67 (153°f)	2bcc153	9	8	9	9	9
6000	80:1	16000	75 (167°f)	2bcc167	8	9	9	9	9



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	40:1	16000	22 (72°f)	2bbc072	7	8	9	9	10
6000	40:1	16000	52 (126°f)	2bbc126	9	9	0	0	0
6000	40:1	16000	67 (153°f)	2bbc153	9	8	8	0	0
6000	40:1	16000	75 (167°f)	2bbc167	8	8	9	9	9



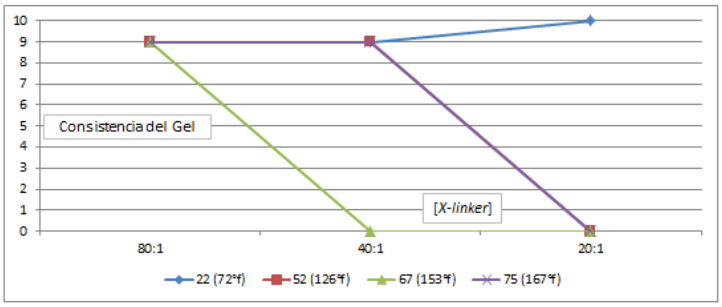
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
6000	20:1	16000	22 (72°f)	2bac072	7	9	9	10	10
6000	20:1	16000	52 (126°f)	2bac126	10	0	0	0	0
6000	20:1	16000	67 (153°f)	2bac153	10	0	0	0	0
6000	20:1	16000	75 (167°f)	2bac167	0	0	0	0	0



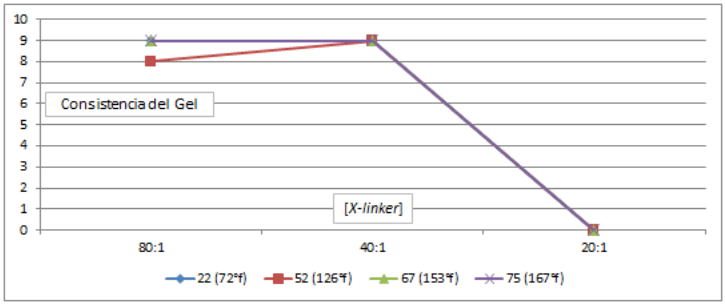
Fuente: El autor.

Figura 26A. Variación del τ final del gel con [*x-linker*] y T, a una [NaCl] y 6.000 PPM de P2.

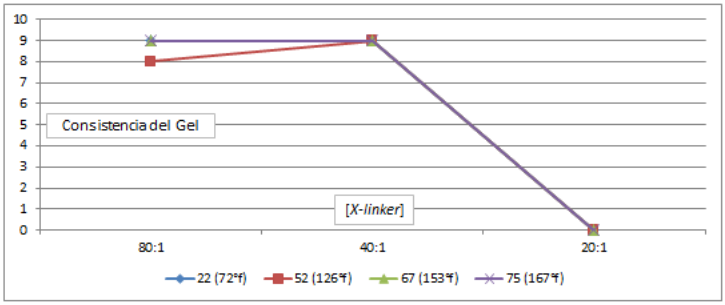
[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
6000	4000	22 (72°f)	2bca072	9	9	10
6000	4000	52 (126°f)	2bca126	9	9	0
6000	4000	67 (153°f)	2bca153	9	0	0
6000	4000	75 (167°f)	2bca167	9	9	0



[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
6000	8000	22 (72°f)	2bcb072	9	9	0
6000	8000	52 (126°f)	2bcb126	8	9	0
6000	8000	67 (153°f)	2bcb153	9	9	0
6000	8000	75 (167°f)	2bcb167	9	9	0

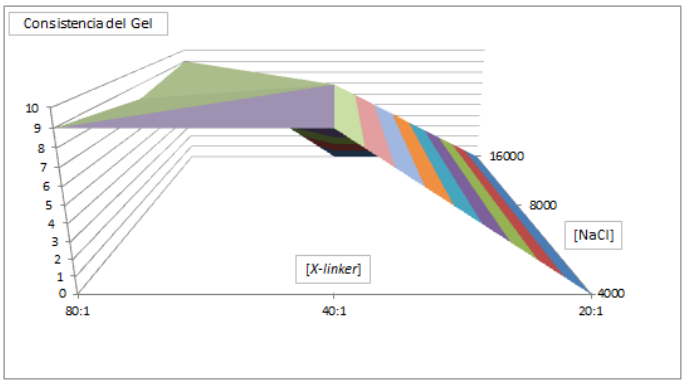


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
6000	16000	22 (72°f)	2bcc072	9	10	10
6000	16000	52 (126°f)	2bcc126	9	0	0
6000	16000	67 (153°f)	2bcc153	9	0	0
6000	16000	75 (167°f)	2bcc167	9	9	0



Fuente: El autor.

Figura 27A. Variación del τ final del gel con [*x-linker*] y [NaCl] a 52°C y 6.000 PPM de P2.

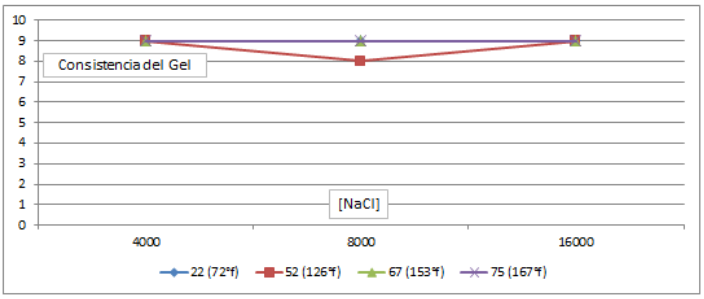


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
6000	4000	52 (126°f)	2bca126	9	9	0
6000	8000	52 (126°f)	2bcb126	8	9	0
6000	16000	52 (126°f)	2bcc126	9	0	0

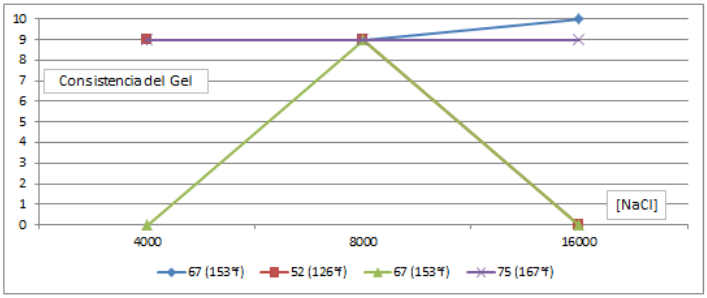
Fuente: El autor.

Figura 28A. Variación del τ final del gel con [NaCl] y T a una [*x-linker*] y 6.000 PPM de P2.

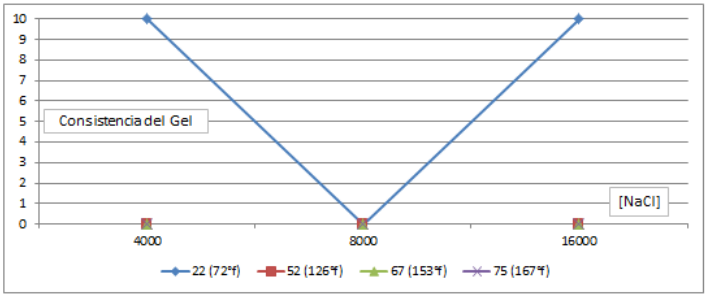
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
6000	80:1	22 (72°f)	2bca072	9	9	9
6000	80:1	52 (126°f)	2bca126	9	8	9
6000	80:1	67 (153°f)	2bca153	9	9	9
6000	80:1	75 (167°f)	2bca167	9	9	9



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
6000	40:1	67 (153°f)	2bba072	9	9	10
6000	40:1	52 (126°f)	2bba126	9	9	0
6000	40:1	67 (153°f)	2bba153	0	9	0
6000	40:1	75 (167°f)	2bba167	9	9	9

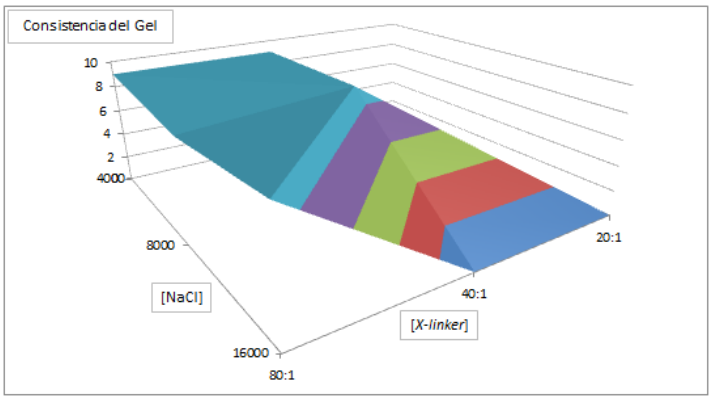


[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
6000	20:1	22 (72°f)	2baa072	10	0	10
6000	20:1	52 (126°f)	2baa126	0	0	0
6000	20:1	67 (153°f)	2baa153	0	0	0
6000	20:1	75 (167°f)	2baa167	0	0	0



Fuente: El autor.

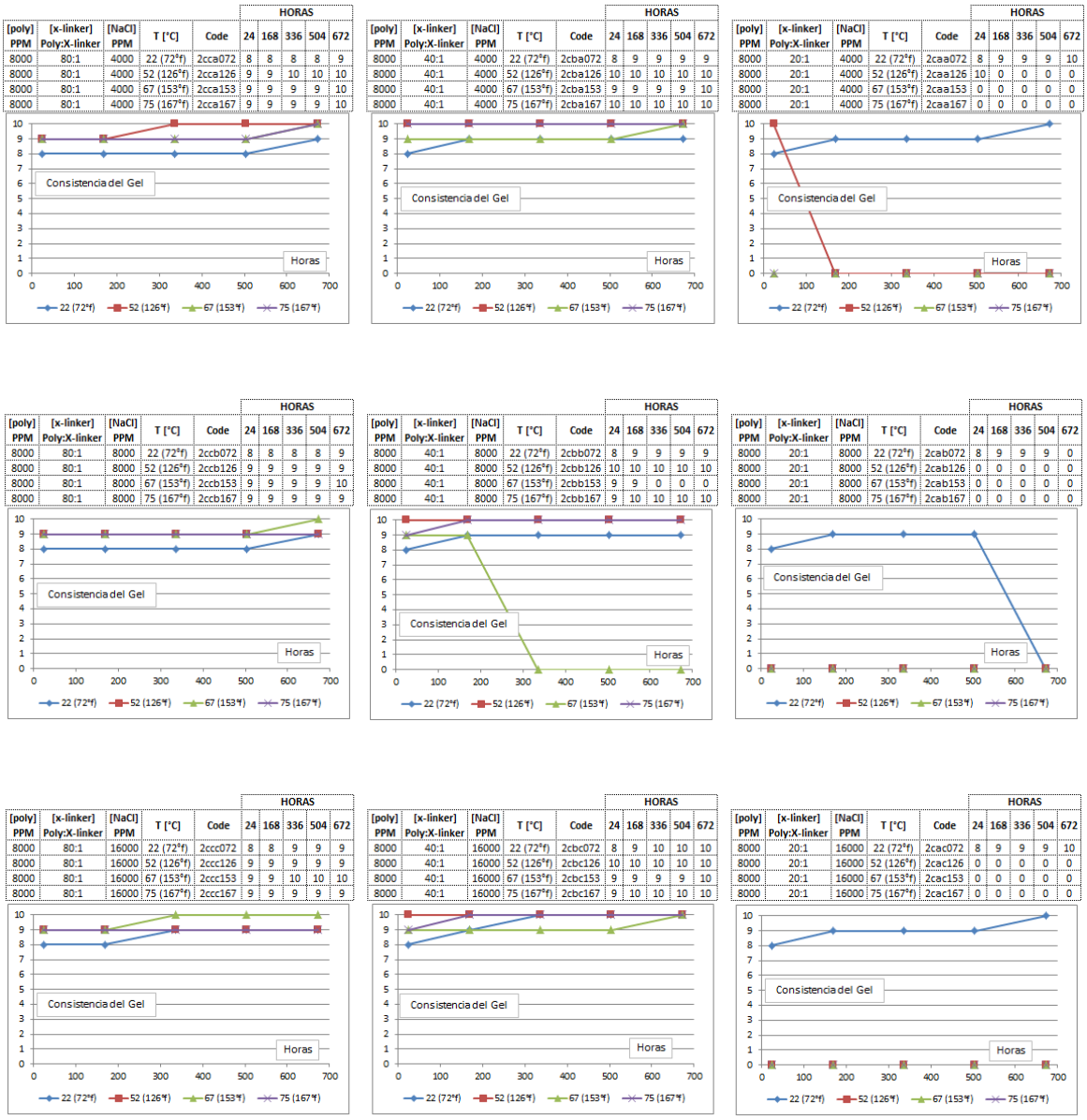
Figura 29A. Variación del τ final del gel con [*x-linker*] y [NaCl] a 52°C y 6.000 PPM de P2.



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
6000	80:1	52 (126°f)	2bca126	9	8	9
6000	40:1	52 (126°f)	2bba126	9	9	0
6000	20:1	52 (126°f)	2baa126	0	0	0

Fuente: El autor.

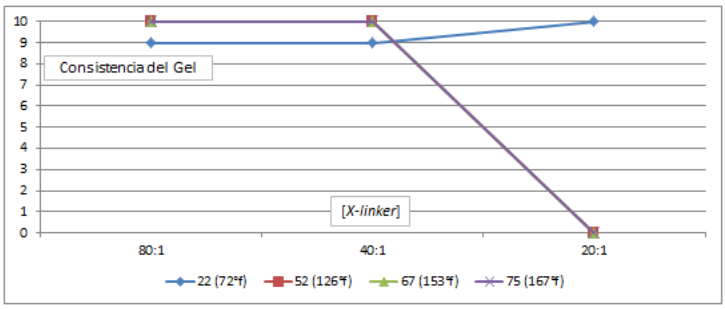
Figura 30A. Variación con el tiempo de las reacciones planteadas a 8.000 PPM de P2.



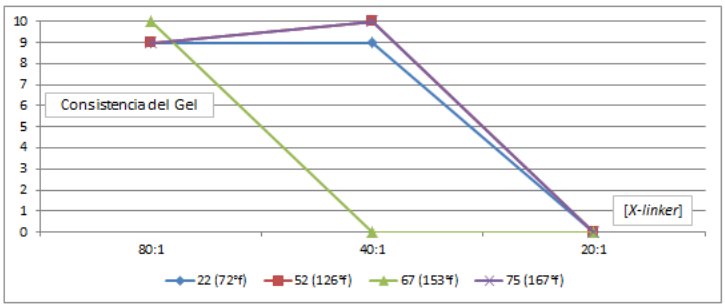
Fuente: El autor.

Figura 31A. Variación del τ final del gel con [*x-linker*] y T, a una [NaCl] y 8.000 PPM de P2.

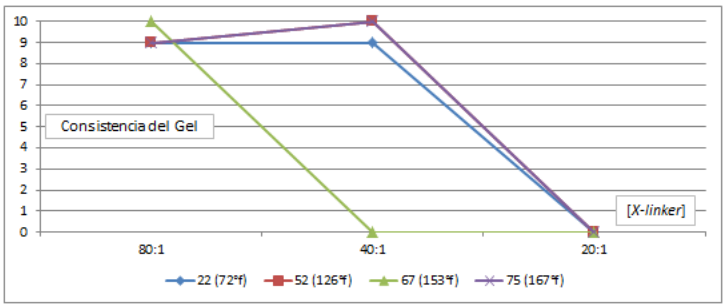
[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
8000	4000	22 (72°f)	2cca072	9	9	10
8000	4000	52 (126°f)	2cca126	10	10	0
8000	4000	67 (153°f)	2cca153	10	10	0
8000	4000	75 (167°f)	2cca167	10	10	0



[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
8000	8000	22 (72°f)	2ccb072	9	9	0
8000	8000	52 (126°f)	2ccb126	9	10	0
8000	8000	67 (153°f)	2ccb153	10	0	0
8000	8000	75 (167°f)	2ccb167	9	10	0

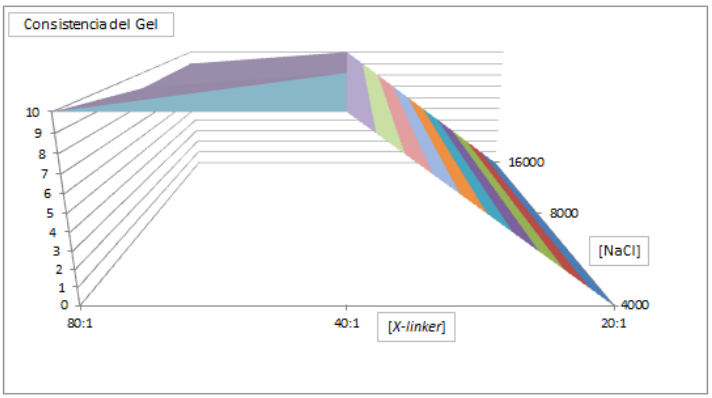


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
8000	16000	22 (72°f)	2ccc072	9	10	10
8000	16000	52 (126°f)	2ccc126	9	10	0
8000	16000	67 (153°f)	2ccc153	10	10	0
8000	16000	75 (167°f)	2ccc167	9	10	0



Fuente: El autor.

Figura 32A. Variación del τ final del gel con [*x-linker*] y [NaCl] a 52°C y 8.000 PPM de P2.

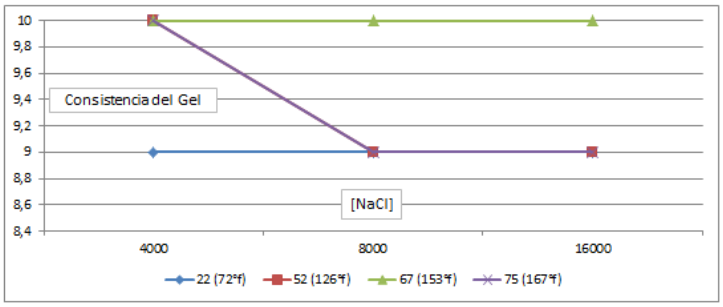


[poly] PPM	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	80:1	40:1	20:1
8000	4000	52 (126°f)	2cca126	10	10	0
8000	8000	52 (126°f)	2ccb126	9	10	0
8000	16000	52 (126°f)	2ccc126	9	10	0

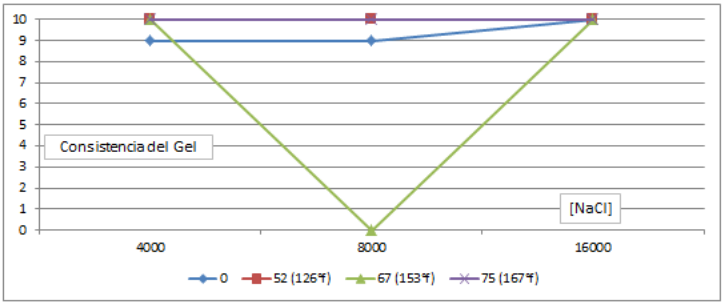
Fuente: El autor.

Figura 33A. Variación del τ final del gel con [NaCl] y Ta una [*x-linker*] y 8.000 PPM de P2.

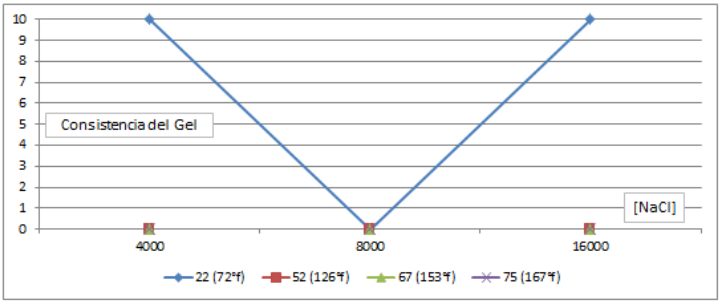
[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
8000	80:1	22 (72°f)	2cca072	9	9	9
8000	80:1	52 (126°f)	2cca126	10	9	9
8000	80:1	67 (153°f)	2cca153	10	10	10
8000	80:1	75 (167°f)	2cca167	10	9	9



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
8000	40:1	0	2cba072	9	9	10
8000	40:1	52 (126°f)	2cba126	10	10	10
8000	40:1	67 (153°f)	2cba153	10	0	10
8000	40:1	75 (167°f)	2cba167	10	10	10

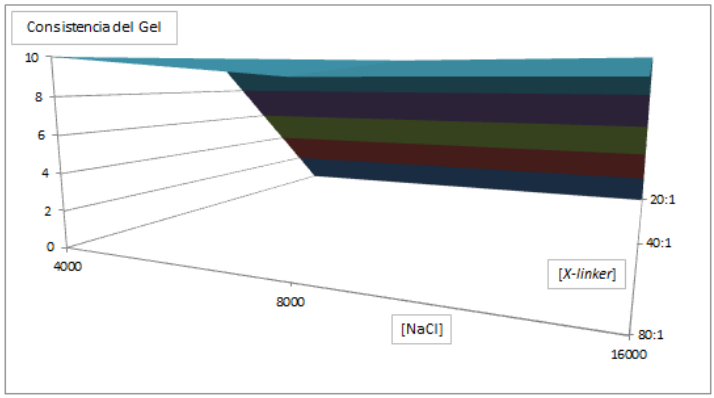


[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
8000	20:1	22 (72°f)	2caa072	10	0	10
8000	20:1	52 (126°f)	2caa126	0	0	0
8000	20:1	67 (153°f)	2caa153	0	0	0
8000	20:1	75 (167°f)	2caa167	0	0	0



Fuente: El autor.

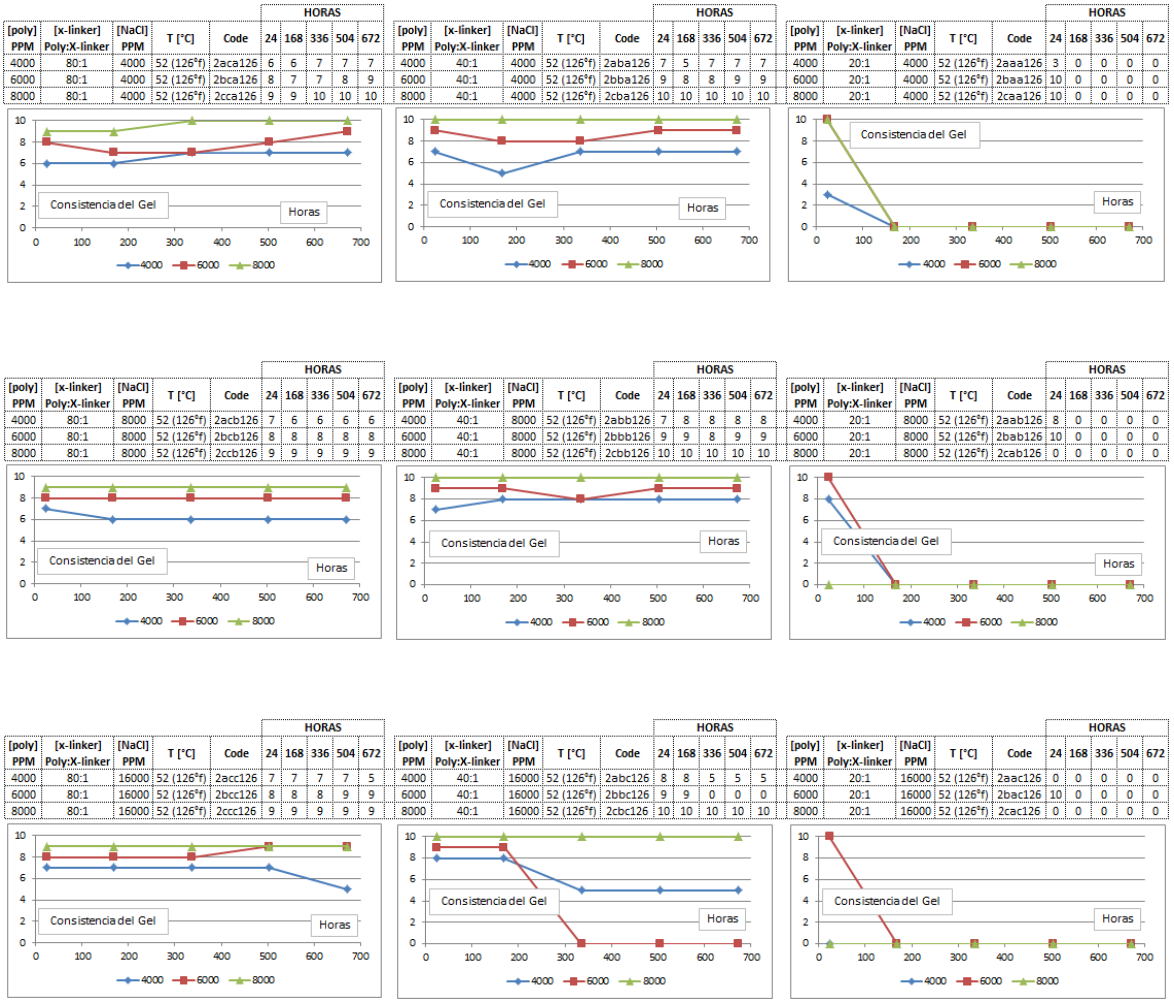
Figura 34A. Variación del τ final del gel con [*x-linker*] y [NaCl] a 52°C y 8.000 PPM de P2.



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	T [°C]	Code	4000	8000	16000
8000	80:1	52 (126°f)	2cca126	10	9	9
8000	40:1	52 (126°f)	2cba126	10	10	10
8000	20:1	52 (126°f)	2caa126	0	0	0

Fuente: El autor.

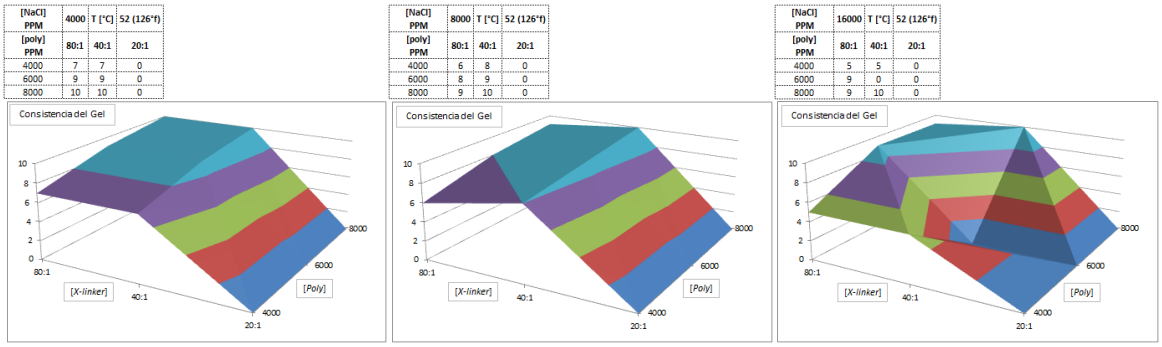
Figura 35A. Variación con el tiempo y [poly] de las reacciones planteadas a 52°C, [x-linker] y [NaCl] para P2.



[poly] PPM	[x-linker] Poly:X-linker	[NaCl] PPM	T [°C]	Code	HORAS 24	168	336	504	672
4000	80:1	4000	52 (126°f)	2aca126	6	6	7	7	7
6000	80:1	4000	52 (126°f)	2bca126	8	7	7	8	9
8000	80:1	4000	52 (126°f)	2cca126	9	9	10	10	10
4000	40:1	4000	52 (126°f)	2aba126	7	5	7	7	7
6000	40:1	4000	52 (126°f)	2bba126	9	8	8	9	9
8000	40:1	4000	52 (126°f)	2cba126	10	10	10	10	10
4000	20:1	4000	52 (126°f)	2aaa126	3	0	0	0	0
6000	20:1	4000	52 (126°f)	2baa126	10	0	0	0	0
8000	20:1	4000	52 (126°f)	2caa126	10	0	0	0	0
4000	80:1	8000	52 (126°f)	2acb126	7	6	6	6	6
6000	80:1	8000	52 (126°f)	2bcb126	8	8	8	8	8
8000	80:1	8000	52 (126°f)	2ccb126	9	9	9	9	9
4000	40:1	8000	52 (126°f)	2abb126	7	8	8	8	8
6000	40:1	8000	52 (126°f)	2bbb126	9	9	8	9	9
8000	40:1	8000	52 (126°f)	2cbb126	10	10	10	10	10
4000	20:1	8000	52 (126°f)	2aab126	8	0	0	0	0
6000	20:1	8000	52 (126°f)	2bab126	10	0	0	0	0
8000	20:1	8000	52 (126°f)	2cab126	0	0	0	0	0
4000	80:1	16000	52 (126°f)	2acc126	7	7	7	7	5
6000	80:1	16000	52 (126°f)	2bcc126	8	8	8	9	9
8000	80:1	16000	52 (126°f)	2ccc126	9	9	9	9	9
4000	40:1	16000	52 (126°f)	2abc126	8	8	5	5	5
6000	40:1	16000	52 (126°f)	2bbc126	9	9	0	0	0
8000	40:1	16000	52 (126°f)	2cbc126	10	10	10	10	10
4000	20:1	16000	52 (126°f)	2aac126	0	0	0	0	0
6000	20:1	16000	52 (126°f)	2bac126	10	0	0	0	0
8000	20:1	16000	52 (126°f)	2cac126	0	0	0	0	0

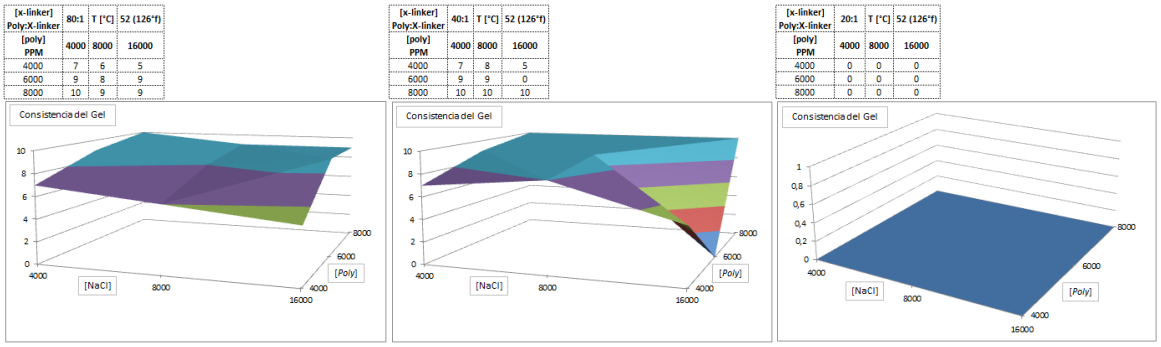
Fuente: El autor.

Figura 36A. Variación del τ final del gel con [poly] y [*x-linker*] a una [NaCl] y 52°C para P2.



Fuente: El autor.

Figura 37A. Variación del τ final del gel con [poly] y [NaCl] a una [*x-linker*] y 52°C para P2.



Fuente: El autor.

ANEXO B. TABLAS DE RESULTADOS PRUEBAS DE DESPLAZAMIENTO

Tabla 1B. *Plug* 8211,5. Inyección de agua línea base.

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
0	0,00	0,35	189,32	1,15
1	0,08	0,35	189,32	1,15
2	0,16	0,38	171,06	1,15
3	0,24	0,34	194,26	1,15
4	0,32	0,33	198,39	1,15
5	0,39	0,36	182,81	1,15
6	0,47	0,37	175,08	1,15
7	0,55	0,40	165,00	1,15
8	0,63	0,34	194,26	1,15
9	0,71	0,35	187,41	1,15
10	0,79	0,37	175,91	1,15
11	0,87	0,38	171,85	1,15
12	0,95	0,40	161,42	1,15
13	1,03	0,35	187,41	1,15
14	1,11	0,36	182,81	1,15
15	1,18	0,37	178,43	1,15
16	1,26	0,39	167,22	1,15
17	1,34	0,38	170,28	1,15
18	1,42	0,35	185,54	1,15
19	1,50	0,34	190,29	1,15
20	1,58	0,36	179,29	1,15
21	1,66	0,40	164,27	1,15
22	1,74	0,36	182,81	1,15
23	1,82	0,36	182,81	1,15
24	1,89	0,36	179,29	1,15
25	1,97	0,39	167,97	1,15
26	2,05	0,41	159,35	1,15
27	2,13	0,35	188,36	1,15
28	2,21	0,36	181,92	1,15
29	2,29	0,37	178,43	1,15

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
30	2,37	0,38	172,64	1,15
31	2,45	0,39	167,22	1,15
32	2,53	0,36	179,29	1,15
33	2,61	0,35	189,32	1,15
34	2,68	0,35	188,36	1,15
35	2,76	0,37	177,58	1,15
36	2,84	0,39	169,50	1,15
37	2,92	0,40	165,00	1,15
38	3,00	0,36	182,81	1,15
39	3,08	0,37	178,43	1,15
40	3,16	0,39	167,22	1,15
41	3,24	0,38	170,28	1,15
42	3,32	0,35	185,54	1,15
43	3,39	0,34	190,29	1,15
44	3,47	0,36	179,29	1,15
45	3,55	0,40	164,27	1,15
46	3,63	0,36	182,81	1,15
47	3,71	0,36	182,81	1,15
48	3,79	0,36	179,29	1,15
49	3,87	0,36	179,29	1,15
50	3,95	0,40	164,27	1,15
51	4,03	0,36	182,81	1,15
52	4,11	0,36	182,81	1,15
53	4,18	0,36	179,29	1,15
54	4,26	0,39	167,97	1,15
55	4,34	0,41	159,35	1,15
56	4,42	0,35	188,36	1,15
57	4,50	0,36	181,92	1,15
58	4,58	0,37	178,43	1,15
59	4,66	0,38	172,64	1,15
60	4,74	0,39	167,22	1,15
61	4,82	0,36	179,29	1,15
62	4,89	0,35	189,32	1,15
63	4,97	0,36	179,29	1,15

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
64	5,05	0,40	164,27	1,15
65	5,13	0,36	182,81	1,15
66	5,21	0,36	182,81	1,15
67	5,29	0,36	179,29	1,15
68	5,37	0,39	167,97	1,15
69	5,45	0,41	159,35	1,15
70	5,53	0,35	188,36	1,15
71	5,61	0,36	181,92	1,15
72	5,68	0,37	178,43	1,15
73	5,76	0,38	172,64	1,15
74	5,84	0,39	167,22	1,15
75	5,92	0,40	164,27	1,15
76	6,00	0,36	182,81	1,15
77	6,08	0,36	182,81	1,15
78	6,16	0,36	179,29	1,15
79	6,24	0,39	167,97	1,15
80	6,32	0,41	159,35	1,15
81	6,39	0,35	188,36	1,15
82	6,47	0,36	181,92	1,15
83	6,55	0,37	178,43	1,15
84	6,63	0,38	172,64	1,15
85	6,71	0,39	167,22	1,15
86	6,79	0,36	179,29	1,15
87	6,87	0,35	189,32	1,15
88	6,95	0,36	179,29	1,15
89	7,03	0,40	164,27	1,15
90	7,11	0,36	182,81	1,15
91	7,18	0,36	182,81	1,15
92	7,26	0,36	179,29	1,15
93	7,34	0,39	167,97	1,15
94	7,42	0,41	159,35	1,15
95	7,50	0,35	188,36	1,15
96	7,58	0,36	181,92	1,15
97	7,66	0,37	178,43	1,15

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
98	7,74	0,38	172,64	1,15
99	7,82	0,39	167,22	1,15
100	7,89	0,36	179,29	1,15
101	7,97	0,35	189,32	1,15
102	8,05	0,36	179,29	1,15
103	8,13	0,40	164,27	1,15
104	8,21	0,36	182,81	1,15

Fuente: El autor.

Tabla 2B. *Plug* 8210,4. Inyección de agua línea base.

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	□P (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
0	0,00	0,19	125,11	0,39
1	0,03	0,19	125,11	0,39
2	0,05	0,19	125,83	0,39
3	0,08	0,19	124,41	0,39
4	0,10	0,19	127,27	0,39
5	0,13	0,19	127,27	0,39
6	0,15	0,19	126,55	0,39
7	0,18	0,19	124,41	0,39
8	0,20	0,19	127,27	0,39
9	0,23	0,19	125,11	0,39
10	0,25	0,19	127,27	0,39
11	0,28	0,19	127,27	0,39
12	0,30	0,19	127,27	0,39
13	0,33	0,19	127,27	0,39
14	0,35	0,19	123,02	0,39
15	0,38	0,19	127,27	0,39
16	0,40	0,19	125,83	0,39
17	0,43	0,19	125,11	0,39
18	0,45	0,19	127,27	0,39
19	0,48	0,19	123,02	0,39
20	0,50	0,19	123,02	0,39
21	0,53	0,19	125,11	0,39

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	□P (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
22	0,55	0,19	127,27	0,39
23	0,58	0,19	123,02	0,39
24	0,60	0,19	123,02	0,39
25	0,63	0,19	123,02	0,39
26	0,65	0,19	122,43	0,39
27	0,68	0,20	122,34	0,39
28	0,70	0,19	126,55	0,39
29	0,73	0,19	123,02	0,39
30	0,75	0,19	127,27	0,39
31	0,78	0,19	125,11	0,39
32	0,80	0,19	127,27	0,39
33	0,83	0,19	123,02	0,39
34	0,85	0,19	126,55	0,39
35	0,88	0,19	127,27	0,39
36	0,90	0,19	125,11	0,39
37	0,93	0,19	127,27	0,39
38	0,96	0,19	127,27	0,39
39	0,98	0,19	127,27	0,39
40	1,01	0,19	127,27	0,39
41	1,03	0,19	126,55	0,39
42	1,06	0,19	127,27	0,39
43	1,08	0,20	122,34	0,39
44	1,11	0,19	123,02	0,39
45	1,13	0,19	127,27	0,39
46	1,16	0,20	122,34	0,39
47	1,18	0,19	123,02	0,39
48	1,21	0,19	123,02	0,39
49	1,23	0,20	122,05	0,39
50	1,26	0,19	122,52	0,39
51	1,28	0,19	122,91	0,39
52	1,31	0,19	123,71	0,39
53	1,33	0,19	125,11	0,39
54	1,36	0,20	122,34	0,39
55	1,38	0,20	122,34	0,39

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	□P (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
56	1,41	0,19	123,02	0,39
57	1,43	0,20	122,34	0,39
58	1,46	0,19	122,91	0,39
59	1,48	0,19	125,11	0,39
60	1,51	0,19	122,52	0,39
61	1,53	0,19	122,52	0,39
62	1,56	0,19	123,02	0,39
63	1,58	0,20	122,34	0,39
64	1,61	0,19	123,71	0,39
65	1,63	0,19	127,27	0,39
66	1,66	0,19	127,27	0,39
67	1,68	0,20	122,34	0,39
68	1,71	0,20	121,00	0,39
69	1,73	0,20	122,34	0,39
70	1,76	0,19	123,02	0,39
71	1,78	0,19	122,43	0,39
72	1,81	0,19	123,02	0,39
73	1,83	0,19	125,11	0,39
74	1,86	0,19	122,91	0,39
75	1,89	0,19	122,52	0,39
76	1,91	0,19	123,71	0,39
77	1,94	0,19	122,91	0,39

Fuente: El autor.

Tabla 3B. *Plug* 8211,5. Inyección de agua luego de la inyección de polímeros.

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
0,0	0,00	0,88	32,33	0,50
0,5	0,02	0,88	32,33	0,50
1,0	0,03	0,88	32,33	0,50
1,5	0,05	28,13	1,01	0,50
2,0	0,07	50,11	0,57	0,50
2,5	0,09	75,60	0,38	0,50

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
3,0	0,10	91,43	0,31	0,50
3,5	0,12	114,29	0,25	0,50
4,0	0,14	148,57	0,19	0,50
4,5	0,15	172,31	0,16	0,50
5,0	0,17	205,71	0,14	0,50
5,5	0,19	222,42	0,13	0,50
6,0	0,21	256,70	0,11	0,50
6,5	0,22	279,56	0,10	0,50
7,0	0,24	304,18	0,09	0,50
7,5	0,26	322,64	0,09	0,50
8,0	0,27	346,37	0,08	0,50
8,5	0,29	367,47	0,08	0,50
9,0	0,31	387,69	0,07	0,50
9,5	0,33	407,03	0,07	0,50
10,0	0,34	421,98	0,07	0,50
10,5	0,36	439,56	0,06	0,50
11,0	0,38	458,90	0,06	0,50
11,5	0,39	471,21	0,06	0,50
12,0	0,41	487,03	0,06	0,50
12,5	0,43	499,34	0,06	0,50
13,0	0,45	509,89	0,06	0,50
13,5	0,46	522,20	0,05	0,50
14,0	0,48	530,99	0,05	0,50
14,5	0,50	541,54	0,05	0,50
15,0	0,51	551,21	0,05	0,50
15,5	0,53	558,24	0,05	0,50
16,0	0,55	567,03	0,05	0,50
16,5	0,57	574,07	0,05	0,50
17,0	0,58	578,46	0,05	0,50
17,5	0,60	585,49	0,05	0,50
18,0	0,62	590,77	0,05	0,50
18,5	0,63	593,41	0,05	0,50
19,0	0,65	599,56	0,05	0,50
19,5	0,67	603,08	0,05	0,50

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
20,0	0,69	606,59	0,05	0,50
20,5	0,70	611,87	0,05	0,50
21,0	0,72	614,50	0,05	0,50
21,5	0,74	617,14	0,05	0,50
22,0	0,76	621,54	0,05	0,50
22,5	0,77	623,30	0,05	0,50
23,0	0,79	626,81	0,05	0,50
23,5	0,81	630,33	0,05	0,50
24,0	0,82	630,33	0,05	0,50
24,5	0,84	632,97	0,04	0,50
25,0	0,86	633,85	0,04	0,50
25,5	0,88	634,72	0,04	0,50
26,0	0,89	638,24	0,04	0,50
26,5	0,91	638,24	0,04	0,50
27,0	0,93	638,24	0,04	0,50
27,5	0,94	640,00	0,04	0,50
28,0	0,96	640,00	0,04	0,50
28,5	0,98	640,00	0,04	0,50
29,0	1,00	641,76	0,04	0,50
29,5	1,01	641,76	0,04	0,50
30,0	1,03	641,76	0,04	0,50
30,5	1,05	642,64	0,04	0,50
31,0	1,06	641,76	0,04	0,50
31,5	1,08	642,64	0,04	0,50
32,0	1,10	642,64	0,04	0,50
32,5	1,12	641,76	0,04	0,50
33,0	1,13	643,52	0,04	0,50
33,5	1,15	642,64	0,04	0,50
34,0	1,17	641,76	0,04	0,50
34,5	1,18	643,52	0,04	0,50
35,0	1,20	642,64	0,04	0,50
35,5	1,22	642,64	0,04	0,50
36,0	1,24	643,52	0,04	0,50
36,5	1,25	642,64	0,04	0,50

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
37,0	1,27	642,64	0,04	0,50
37,5	1,29	643,52	0,04	0,50
38,0	1,30	641,76	0,04	0,50
38,5	1,32	643,52	0,04	0,50
39,0	1,34	642,64	0,04	0,50
39,5	1,36	641,76	0,04	0,50
40,0	1,37	642,64	0,04	0,50
40,5	1,39	642,64	0,04	0,50
41,0	1,41	641,76	0,04	0,50
41,5	1,42	642,64	0,04	0,50
42,0	1,44	642,64	0,04	0,50
42,5	1,46	640,88	0,04	0,50
43,0	1,48	642,64	0,04	0,50
43,5	1,49	641,76	0,04	0,50
44,0	1,51	640,88	0,04	0,50
44,5	1,53	641,76	0,04	0,50
45,0	1,54	640,88	0,04	0,50
45,5	1,56	640,00	0,04	0,50
46,0	1,58	640,88	0,04	0,50
46,5	1,60	640,00	0,04	0,50
47,0	1,61	640,00	0,04	0,50
47,5	1,63	640,88	0,04	0,50
48,0	1,65	639,12	0,04	0,50
48,5	1,66	638,24	0,04	0,50
49,0	1,68	639,12	0,04	0,50
49,5	1,70	638,24	0,04	0,50
50,0	1,72	638,24	0,04	0,50
50,5	1,73	638,24	0,04	0,50
51,0	1,75	636,48	0,04	0,50
51,5	1,77	638,24	0,04	0,50
52,0	1,78	637,36	0,04	0,50
52,5	1,80	635,60	0,04	0,50
53,0	1,82	637,36	0,04	0,50
53,5	1,84	637,36	0,04	0,50

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
54,0	1,85	636,48	0,04	0,50
54,5	1,87	637,36	0,04	0,50
55,0	1,89	636,48	0,04	0,50
55,5	1,90	633,85	0,04	0,50
56,0	1,92	634,72	0,04	0,50
56,5	1,94	633,85	0,04	0,50
57,0	1,96	632,09	0,04	0,50
57,5	1,97	632,09	0,04	0,50
58,0	1,99	631,21	0,05	0,50
58,5	2,01	630,33	0,05	0,50
59,0	2,03	631,21	0,05	0,50
59,5	2,04	628,57	0,05	0,50
60,0	2,06	628,57	0,05	0,50
60,5	2,08	627,69	0,05	0,50
61,0	2,09	625,93	0,05	0,50
61,5	2,11	625,93	0,05	0,50
62,0	2,13	625,05	0,05	0,50
62,5	2,15	622,42	0,05	0,50
63,0	2,16	623,30	0,05	0,50
63,5	2,18	622,42	0,05	0,50
64,0	2,20	619,78	0,05	0,50
64,5	2,21	620,66	0,05	0,50
65,0	2,23	619,78	0,05	0,50
65,5	2,25	618,02	0,05	0,50
66,0	2,27	618,02	0,05	0,50
66,5	2,28	616,26	0,05	0,50
67,0	2,30	615,38	0,05	0,50
67,5	2,32	616,26	0,05	0,50
68,0	2,33	615,38	0,05	0,50
68,5	2,35	614,50	0,05	0,50
69,0	2,37	615,38	0,05	0,50
69,5	2,39	613,63	0,05	0,50
70,0	2,40	614,50	0,05	0,50
70,5	2,42	613,63	0,05	0,50

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
71,0	2,44	612,75	0,05	0,50
71,5	2,45	611,87	0,05	0,50
72,0	2,47	612,75	0,05	0,50
72,5	2,49	611,87	0,05	0,50
73,0	2,51	611,87	0,05	0,50
73,5	2,52	611,87	0,05	0,50
74,0	2,54	610,11	0,05	0,50
74,5	2,56	610,11	0,05	0,50
75,0	2,57	610,11	0,05	0,50
75,5	2,59	607,47	0,05	0,50
76,0	2,61	608,35	0,05	0,50
76,5	2,63	606,59	0,05	0,50
77,0	2,64	604,83	0,05	0,50
77,5	2,66	604,83	0,05	0,50
78,0	2,68	603,96	0,05	0,50
78,5	2,69	601,32	0,05	0,50
79,0	2,71	602,20	0,05	0,50
79,5	2,73	599,56	0,05	0,50
80,0	2,75	597,80	0,05	0,50
80,5	2,76	597,80	0,05	0,50
81,0	2,78	595,16	0,05	0,50
81,5	2,80	594,29	0,05	0,50
82,0	2,81	593,41	0,05	0,50
82,5	2,83	590,77	0,05	0,50
83,0	2,85	590,77	0,05	0,50
83,5	2,87	589,89	0,05	0,50
84,0	2,88	587,25	0,05	0,50
84,5	2,90	587,25	0,05	0,50
85,0	2,92	586,37	0,05	0,50
85,5	2,93	584,61	0,05	0,50
86,0	2,95	584,61	0,05	0,50
86,5	2,97	583,74	0,05	0,50
87,0	2,99	581,98	0,05	0,50
87,5	3,00	581,98	0,05	0,50

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
88,0	3,02	580,22	0,05	0,50
88,5	3,04	578,46	0,05	0,50
89,0	3,05	578,46	0,05	0,50
89,5	3,07	577,58	0,05	0,50
90,0	3,09	574,94	0,05	0,50
90,5	3,11	574,94	0,05	0,50
91,0	3,12	573,19	0,05	0,50
91,5	3,14	572,31	0,05	0,50
92,0	3,16	572,31	0,05	0,50
92,5	3,17	570,55	0,05	0,50
93,0	3,19	569,67	0,05	0,50
93,5	3,21	569,67	0,05	0,50
94,0	3,23	567,91	0,05	0,50
94,5	3,24	568,79	0,05	0,50
95,0	3,26	567,91	0,05	0,50
95,5	3,28	566,15	0,05	0,50
96,0	3,30	566,15	0,05	0,50
96,5	3,31	566,15	0,05	0,50
97,0	3,33	564,39	0,05	0,50
97,5	3,35	565,27	0,05	0,50
98,0	3,36	563,52	0,05	0,50
98,5	3,38	560,88	0,05	0,50
99,0	3,40	560,88	0,05	0,50
99,5	3,42	559,12	0,05	0,50
100,0	3,43	556,48	0,05	0,50
100,5	3,45	556,48	0,05	0,50
101,0	3,47	555,60	0,05	0,50
101,5	3,48	552,09	0,05	0,50
102,0	3,50	552,09	0,05	0,50
102,5	3,52	550,33	0,05	0,50
103,0	3,54	549,45	0,05	0,50
103,5	3,55	548,57	0,05	0,50
104,0	3,57	546,81	0,05	0,50
104,5	3,59	545,93	0,05	0,50

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
105,0	3,60	545,05	0,05	0,50
105,5	3,62	542,42	0,05	0,50
106,0	3,64	542,42	0,05	0,50
106,5	3,66	540,66	0,05	0,50
107,0	3,67	538,02	0,05	0,50
107,5	3,69	538,90	0,05	0,50
108,0	3,70	538,02	0,03	0,25
108,5	3,71	535,38	0,03	0,25
109,0	3,72	536,26	0,03	0,25
109,5	3,72	523,96	0,03	0,25
110,0	3,73	508,13	0,03	0,25
110,5	3,74	497,58	0,03	0,25
111,0	3,75	487,03	0,03	0,25
111,5	3,76	474,72	0,03	0,25
112,0	3,77	465,93	0,03	0,25
112,5	3,78	455,38	0,03	0,25
113,0	3,78	447,47	0,03	0,25
113,5	3,79	440,44	0,03	0,25
114,0	3,80	434,29	0,03	0,25
114,5	3,81	427,25	0,03	0,25
115,0	3,82	423,74	0,03	0,25
115,5	3,83	418,46	0,03	0,25
116,0	3,84	413,19	0,03	0,25
116,5	3,84	411,43	0,03	0,25
117,0	3,85	407,03	0,03	0,25
117,5	3,86	402,64	0,04	0,25
118,0	3,87	401,76	0,04	0,25
118,5	3,88	400,00	0,04	0,25
119,0	3,89	395,60	0,04	0,25
119,5	3,90	395,60	0,04	0,25
120,0	3,90	392,09	0,04	0,25
120,5	3,91	389,45	0,04	0,25
121,0	3,92	389,45	0,04	0,25
121,5	3,93	386,81	0,04	0,25

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
122,0	3,94	385,93	0,04	0,25
122,5	3,95	385,93	0,04	0,25
123,0	3,96	383,30	0,04	0,25
123,5	3,96	382,42	0,04	0,25
124,0	3,97	382,42	0,04	0,25
124,5	3,98	379,78	0,04	0,25
125,0	3,99	379,78	0,04	0,25
125,5	4,00	379,78	0,04	0,25
126,0	4,01	377,14	0,04	0,25
126,5	4,02	378,02	0,04	0,25
127,0	4,02	378,02	0,04	0,25
127,5	4,03	376,26	0,04	0,25
128,0	4,04	377,14	0,04	0,25
128,5	4,05	377,14	0,04	0,25
129,0	4,06	375,38	0,04	0,25
129,5	4,07	376,26	0,04	0,25
130,0	4,08	376,26	0,04	0,25
130,5	4,08	375,38	0,04	0,25
131,0	4,09	376,26	0,04	0,25
131,5	4,10	376,26	0,04	0,25
132,0	4,11	375,38	0,04	0,25
132,5	4,12	376,26	0,04	0,25
133,0	4,13	376,26	0,04	0,25
133,5	4,14	374,51	0,04	0,25
134,0	4,14	376,26	0,04	0,25
134,5	4,15	376,26	0,04	0,25
135,0	4,16	374,51	0,04	0,25
135,5	4,17	376,26	0,04	0,25
136,0	4,18	375,38	0,04	0,25
136,5	4,19	375,38	0,04	0,25
137,0	4,20	377,14	0,04	0,25
137,5	4,20	376,26	0,04	0,25
138,0	4,21	376,26	0,04	0,25
138,5	4,22	377,14	0,04	0,25

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
139,0	4,23	376,26	0,04	0,25
139,5	4,24	376,26	0,04	0,25
140,0	4,25	378,02	0,04	0,25
140,5	4,26	376,26	0,04	0,25
141,0	4,26	376,26	0,04	0,25
141,5	4,27	377,14	0,04	0,25
142,0	4,28	376,26	0,04	0,25
142,5	4,29	376,26	0,04	0,25
143,0	4,30	377,14	0,04	0,25
143,5	4,31	375,38	0,04	0,25
144,0	4,32	377,14	0,04	0,25
144,5	4,32	378,02	0,04	0,25
145,0	4,33	377,14	0,04	0,25
145,5	4,34	378,02	0,04	0,25
146,0	4,35	378,90	0,04	0,25
146,5	4,36	378,02	0,04	0,25
147,0	4,37	378,90	0,04	0,25
147,5	4,38	378,90	0,04	0,25
148,0	4,38	378,02	0,04	0,25
148,5	4,39	378,90	0,04	0,25
149,0	4,40	378,90	0,04	0,25
149,5	4,41	378,02	0,04	0,25
150,0	4,42	378,02	0,04	0,25
150,5	4,43	378,90	0,04	0,25
151,0	4,44	377,14	0,04	0,25
151,5	4,44	378,90	0,04	0,25
152,0	4,45	378,90	0,04	0,25
152,5	4,46	378,02	0,04	0,25
153,0	4,47	378,90	0,04	0,25
153,5	4,48	379,78	0,04	0,25
154,0	4,49	378,02	0,04	0,25
154,5	4,50	378,90	0,04	0,25
155,0	4,51	379,78	0,04	0,25
155,5	4,51	378,02	0,04	0,25

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
156,0	4,52	378,02	0,04	0,25
156,5	4,53	378,90	0,04	0,25
157,0	4,54	378,02	0,04	0,25
157,5	4,55	378,02	0,04	0,25
158,0	4,56	378,02	0,04	0,25
158,5	4,57	377,14	0,04	0,25
159,0	4,57	378,90	0,04	0,25
159,5	4,58	378,90	0,04	0,25
160,0	4,59	378,02	0,04	0,25
160,5	4,60	379,78	0,04	0,25
161,0	4,61	379,78	0,04	0,25
161,5	4,62	378,90	0,04	0,25
162,0	4,63	378,90	0,04	0,25
162,5	4,63	379,78	0,04	0,25
163,0	4,64	378,90	0,04	0,25
163,5	4,65	379,78	0,04	0,25
164,0	4,66	379,78	0,04	0,25
164,5	4,67	378,90	0,04	0,25
165,0	4,68	379,78	0,04	0,25
165,5	4,69	379,78	0,04	0,25
166,0	4,69	378,90	0,04	0,25
166,5	4,70	379,78	0,04	0,25
167,0	4,71	379,78	0,04	0,25
167,5	4,72	379,78	0,04	0,25
168,0	4,73	380,66	0,04	0,25
168,5	4,74	379,78	0,04	0,25
169,0	4,75	379,78	0,04	0,25
169,5	4,75	381,54	0,04	0,25
170,0	4,76	380,66	0,04	0,25
170,5	4,77	379,78	0,04	0,25
171,0	4,78	381,54	0,04	0,25
171,5	4,79	380,66	0,04	0,25
172,0	4,80	381,54	0,04	0,25
172,5	4,81	382,42	0,04	0,25

t acumulado (min)	Vol. P (cm^3)	ΔP (Psi)	K (md)	Qw iny (cm^3/min)
173,0	4,81	380,66	0,04	0,25
173,5	4,82	381,54	0,04	0,25
174,0	4,83	381,54	0,04	0,25
174,5	4,84	380,66	0,04	0,25
175,0	4,85	380,66	0,04	0,25
175,5	4,86	380,66	0,04	0,25
176,0	4,87	379,78	0,04	0,25
176,5	4,87	381,54	0,04	0,25
177,0	4,88	380,66	0,04	0,25
177,5	4,89	379,78	0,04	0,25
178,0	4,90	381,54	0,04	0,25
178,5	4,91	381,54	0,04	0,25
179,0	4,92	379,78	0,04	0,25
179,5	4,93	381,54	0,04	0,25
180,0	4,93	381,54	0,04	0,25
180,5	4,94	381,54	0,04	0,25
181,0	4,95	382,42	0,04	0,25
181,5	4,96	382,42	0,04	0,25
182,0	4,97	381,54	0,04	0,25

Fuente: El autor.